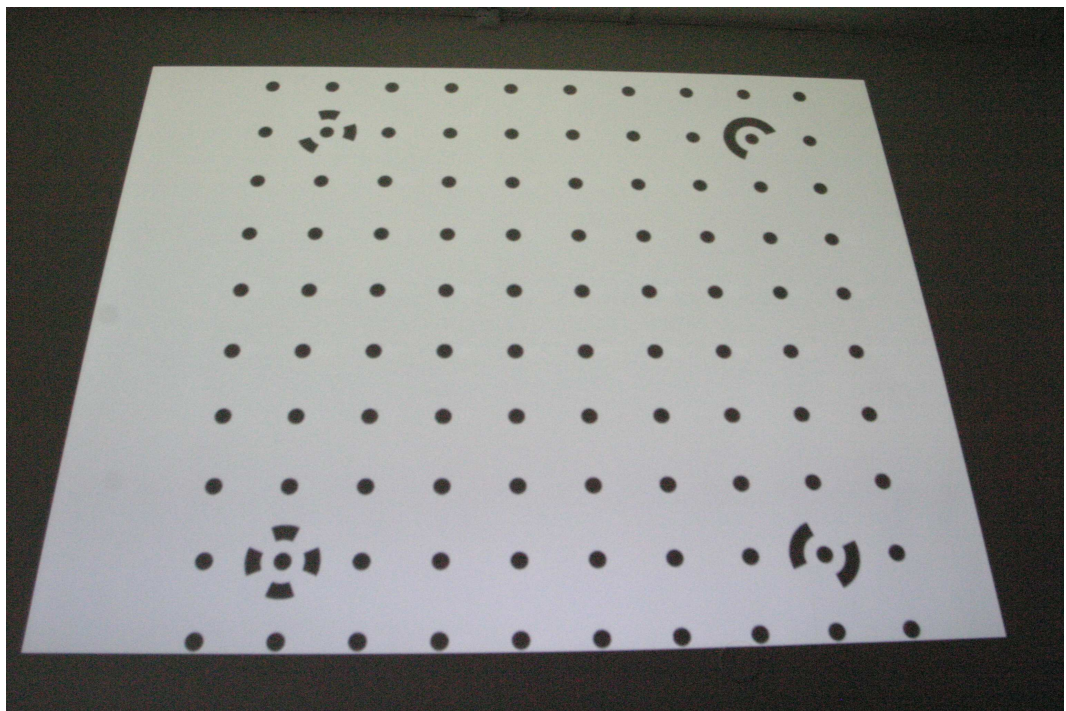


Masteroppgave i geofag

# Kalibrering av ikke-metriske kameraer

Thomas Odberg



**UNIVERSITETET I OSLO**

**DET MATEMATISK-NATURVITENSKAPELIGE FAKULTET**



# Kalibrering av ikke-metriske kameraer

Thomas Odberg



Masteroppgave i geofag

Studieretning: Naturgeografi, hydrologi og geomatikk

Institutt for geofag

Matematisk-naturvitenskaplig fakultet

UNIVERSITETET I OSLO

15. mars 2006



© **Thomas Odberg, 2005**

Veileder: Trond Eiken, UiO

Dette eksamensarbeidet er publisert elektronisk i DUO – Digitale Utgivelser ved UiO

<http://www.duo.uio.no>

Det er også katalogisert i BIBSYS (<http://www.bibsys.no/>)

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced or transmitted, in any form or by any means, without permission

---

## Forord

Denne oppgaven er en del av Masterstudiet på institutt for geofag ved Universitetet i Oslo. Oppgaven er gitt av veileder, senioringeniør Trond Eiken.

Jeg ønsker å takke:

Veileder Trond Eiken for god veiledning, samtaler, innspill, teknisk støtte og tilgjengelighet.

Blom geomatics for lån av skanner og programvare, og for tilretteleggingen slik at jeg har kunnet fullføre oppgaven.

Samboer Marianne for støtte, oppmuntring og ikke minst intensiv hjelp den siste tiden.

Medstudenter for et trivelig studiemiljø på geofag.

Venner og familie for tålmodighet i hektiske perioder.

Oslo, 15. mars 2006

Thomas Odberg,

---

## Sammendrag

I denne oppgaven ble kalibrerings funksjonene i Photomodeler og Nlhbunt vurdert for bruk innenfor nærfotogrammetriske formål på Universitetet i Oslo. Universitetet i Oslo disponerer et digitalt Canon kamera og et analogt Hasselblad kamera, og det ble derfor gjort forsøk på å beregne den indre geometrien for disse to kameraene.

Som grunnlag for kalibreringen i Nlhbunt er det opprettet et romlig testfelt, bestående av tre fotostasjoner og 47 kontrollpunkt innmålt med en totalstasjon. Det viste seg at kalibreringene stiller høy krav til nettverksgeometrien, derfor ble det gjort forsøk med utvidet testfelt. Og på grunnlag av ulike testfelt er kvaliteten av kalibreringene vurdert.

Ved å tilbakeføre kalibreringsparameterne til Image station, den fotogrammetriske programvaren som i dag er i bruk på instituttet, var formålet å vise hvilket forbedringspotensialet en innføring av kalibreringsparametere har.

Kalibreringsparameterne fra Photomodeler viser seg å være vanskelig å overføre til annen programvare. Nlhbunt viser derimot at en innføring av kalibreringsparametere gir høy nøyaktighetsgevinst.

---

# Innhold

<b>FORORD .....</b>	<b>II</b>
<b>SAMMENDRAG.....</b>	<b>III</b>
<b>INNHold .....</b>	<b>IV</b>
<b>1. INNLEDNING .....</b>	<b>1</b>
1.1 BAKGRUNN.....	1
1.2 PROBLEMSTILLING.....	2
<b>2. TEORI .....</b>	<b>3</b>
2.1 STRÅLEBUNTMETODE.....	3
2.2 FORTEGNINGER .....	5
2.2.1 Radiell fortegning.....	6
2.2.2 Desentrerende fortegning.....	9
2.2.3 Fortegninger i planet .....	10
2.2.4 Fortegninger ut av planet.....	11
2.3 TILLEGGSPARAMETRE .....	12
2.4 IKKE-METRISKE KAMERAER.....	14
2.5 METODER FOR KAMERA KALIBRERING .....	15
2.5.1 Laboratorie metoder .....	15
2.5.2 On-the-job .....	16
2.5.3 Selv-kalibrering.....	16
2.5.4 Loddlinje kalibrering .....	17
2.5.5 Stellar-calibration .....	17
2.5.6 Testfeltkalibrering .....	17



---

2.5.7	<i>Automatiske kalibreringsmetoder</i> .....	18
<b>3.</b>	<b>METODE</b> .....	<b>20</b>
3.1	KALIBRERING I NLHBUNT .....	20
3.1.1	<i>Testfeltet</i> .....	21
3.2	KALIBRERING I PHOTOMODELER .....	24
<b>4.</b>	<b>GJENNOMFØRING OG RESULTATER</b> .....	<b>26</b>
4.1	KALIBRERING I NLHBUNT .....	26
4.2	KALIBRERING I PHOTOMODELER .....	33
<b>5.</b>	<b>DISKUSJON</b> .....	<b>37</b>
5.1	KALIBRERING I NLHBUNT .....	37
5.2	KALIBRERING I PHOTOMODELER .....	44
5.2.2	<i>Stabilitet</i> .....	45
5.3	VIDEREFØRING AV OPPGAVEN .....	47
<b>6.</b>	<b>KONKLUSJON</b> .....	<b>48</b>
	<b>KILDELISTE</b> .....	<b>49</b>
	<b>VEDLEGG</b> .....	<b>52</b>

---

# 1. Innledning

En av forutsetningene for fotogrammetrisk aktivitet er at man har kontroll over den indre geometrien i kameraet. Ved å gjennomføre kalibreringer av kameraet kommer man frem til parameterne som beskriver den indre geometrien. Innen flyfotogrammetrien skjer dette normalt under kontrollerte omgivelser i produsentens kalibreringslaboratorium ved hjelp av kostbare og tidkrevende metoder som for eksempel goniometer, multi-kolimator eller testfelt. Innen nærfotogrammetrien vil forutsetningene for kalibreringene være av en helt annen art. Nærfotogrammetrien bruker ofte lavkost kameraer som i utgangspunktet hadde et annet formål enn å fungere som et måleinstrument og det vil derfor være opp til brukeren å gjennomføre en geometrisk kalibrering av kameraet. Det har derfor opp igjennom tidene blitt utviklet en rekke metoder og teknikker for kalibrering av kameraer, i første rekke for bruk innen industrimålinger.

## 1.1 Bakgrunn

Tradisjonelt sett er fotogrammetri kostbart og basert på kompliserte systemer, men siden innføringen av den digitale fotogrammetrien, har det stadig blitt utviklet nye teknikker og metoder innen kamerateknologi og bildebehandling. En av disse nyvinningene er Photomodeler som er et typisk eksempel på et program som bruker formelverk fra tradisjonell fotogrammetri og pakker det inn i brukervennlige omgivelser slik at "folk flest" kan kalibrere og gjøre sitt eget kamera til et avansert måleinstrument. Matlab camera calibration toolbox er et eksempel på tilsvarende program. Tilgjengelighet og stadige teknologiske forbedringer har ført med seg en økende interesse for fotogrammetri og fra de siste årene finnes det utallige eksempler på utvidelser av nærfotogrammetriens bruksområder. Naturgeografi er et fagområde som tradisjonelt har utnyttet seg av fotogrammetri. I de siste årene har det kommet en rekke publikasjoner der nærfotogrammetri er brukt til å overvåke og måle

---

geomorfologiske prosesser. For eksempel er lavkost kameraer tatt i bruk innenfor glasiologi (Pitkanen og Kajuutti, 2004), hydrologi (Butler et al, 2002) og sedimentologi (Chandler et al, 2005; Dirk et al, 2005) for å nevne noen områder. I alle tilfellene har det blitt gjort fotogrammetriske målinger for å vise overflateendringer. Felles for disse undersøkelsene er at de alle omhandler kjerneområdene for Institutt for geofag ved Universitetet i Oslo. Det ville derfor være interessant for Instituttet å kunne ta i bruk sine kameraer til målinger innenfor sine fagfelt. Det er et spørsmål om tid før de digitale kameraene er av en kvalitet og har en oppløsning som utvider dem til å kunne brukes til ”mellomdistanse fotogrammetri”. For å gjøre nøyaktige målinger med lavkost kameraer er det viktig at man har kontroll over de indre orienteringsparameterne og at parameterne lar seg overføre mellom den programvaren som i dag brukes av instituttet.

## 1.2 Problemstilling

Institutt for geofag disponerer i dag to kameraer. Et analogt filmkamera av typen Hasselblad og et digitalt speilreflekskamera av typen Canon. Målet med denne oppgaven er å beskrive den indre geometrien i kameraene ved å gjennomføre kalibreringer. Kalibreringsresultatet skal vurderes i programvaren Image Station, som er den fotogrammetriske programvaren tilgjengelig ved Instituttet. For å nå dette målet skal det gjennomføres flere kalibreringer der ulike metoder skal tas i bruk. I den forbindelse vil følgende spørsmål besvares:

**Vil Photomodelers kamera kalibrering være en tilfredstillende metode for å definere den indre geometri, når hensikten er utnyttelse i annen fotogrammetrisk programvare i dette tilfellet Image Station?**

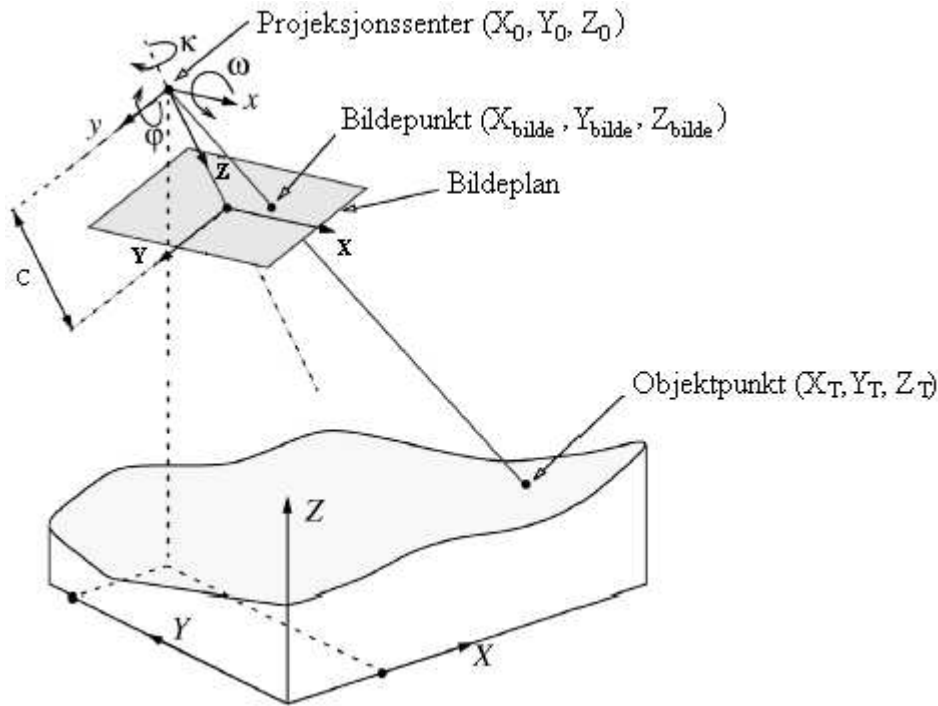
**Hvilket forbedringspotensial ligger i innføring av kalibreringsparameterne?**

---

## 2. Teori

### 2.1 Strålebuntmetode

Strålebuntmetoden blir i fotogrammetrien brukt for å beregne et objekts 3-dimensjonale koordinater på grunnlag av bildets 2-dimensjonale koordinater. I strålebuntmetoden gjenskapes kameraets fotograferingssituasjoner ved hjelp av den perspektiviske projeksjon (figur 2.1). Figuren viser at kameraets koordinatsystem er definert som  $X_0$ ,  $Y_0$  og  $Z_0$ , der  $Z$ -aksen er vinkelrett på bildeplanet. Kameraets rotasjoner er representert ved Kappa ( $\kappa$ ),  $\phi$  ( $\varphi$ ) og omega ( $\omega$ ). Disse beskriver rotasjoner rundt aksene i kameraets koordinatsystem. Grunnlaget for beregningen ligger i det perspektiviske sambandet, også kalt kollinearitetsprinsippet. Dette prinsippet går ut på at hvert objekt blir projisert på en rett linje gjennom projeksjonssenteret og inn på bildeplanet. Kollinearitetsprinsippet og formel (2.1) gjelder for feilfrie målinger og beskriver transformasjonen mellom et objekts koordinater og bildeplanets koordinater. Normalt sett finnes det en mengde feilkilder, der i blant målenøyaktighet og fortegninger i linsesystemet. Av formel (2.1) danner man derfor feillikninger som inngår i en elementutjevning der man minimaliserer feilene, derav strålebuntutjevning (Andersen et al, 1994).



Figur 2.1: Perspektivisk projeksjon med bildeplanet i positiv posisjon. Fra (Heikkilä, 2000)

$$\begin{aligned} X_{bilde} &= -c \frac{a_{11}(x_T - x_0) + a_{12}(y_T - y_0) + a_{13}(z_T - z_0)}{a_{31}(x_T - x_0) + a_{32}(y_T - y_0) + a_{33}(z_T - z_0)} \\ Y_{bilde} &= -c \frac{a_{21}(x_T - x_0) + a_{22}(y_T - y_0) + a_{23}(z_T - z_0)}{a_{31}(x_T - x_0) + a_{32}(y_T - y_0) + a_{33}(z_T - z_0)} \end{aligned} \quad (2.1)$$

## Kamarakonstant

Kamerakonstanten defineres av den vinkelrette avstanden fra projeksjonssenteret og ned på bildeplanet (Ziemann og Taymana, 1984). Kamerakonstanten betegnes også som prinsipal distansen. For kameraer med variabel fokus og zoom vil prinsipal distansen ikke være konstant. Hvis kamera er i ytre fokus, noe som er vanlig innen flyfotogrammetrien, vil betegnelser som fokal lengde og brennvidde kunne brukes. I denne oppgaven vil betegnelsen kamera konstant bli brukt, selv om den nødvendigvis ikke er konstant.

---

## Hovedpunktet

Hovedpunktet er sentrum av bildet som dannes på bildeplanet og hovedpunktet er lokalisert der normalen fra det fremre projeksjonssenteret treffer bildeplanet. Dette punktet blir kalt også kalt prinsipal punktet (PPA). Det forutsettes da at bildeplanet står normalt på de optiske aksene (Roelofs, 1951). Hvis dette ikke er tilfellet vil man kunne innføre et punkt, symmetrisk prinsipal punkt (PPS), som tar høyde for asymmetrien. Symmetrisk prinsipal punkt (PPS) er definert som det punktet der forskjellen mellom radiell fortegning og gjennomsnittlig radiell fortegning er minimal (Ziemann og Taymana, 1984). Radiell fortegning omtales i kapittel 2.2. I nærfotogrammetrien blir vanligvis PPA brukt som hovedpunkt, siden forskjellen mellom PPS og PPA er så liten (Fryer, 1996).

## 2.2 Fortegninger

Noe forenklet består et kamera av en linse og et billedplan. For å forklare transformasjonen for et objekt fra virkeligheten til billedplanet bruker man i fotogrammetrien perspektivisk transformasjon. Den perspektiviske projeksjon er en tilnærming av hendelsesforløpet i et kamera. Som nevnt tidligere forutsettes det at objekt, projeksjonssenter og bildepunkt ligger på en rett linje, men i praksis vil ikke dette inntreffe. Ideelt sett skulle en lysstråle ha passert linsesystemet lineært, men i praksis består linsesystemet av flere optiske elementer som fører til en ikke-lineær fortegning. For å kompensere for fortegningene i linsen er man avhengig av å få kontroll på den indre geometrien i kameraet. Ved å modellere lysets bevegelse i kameraet kan de indre orienteringsparameterne bestemmes. De indre orienteringsparameterne beskriver de ulike avvikene i et linsesystem. Ved å gjennomføre en kamerakalibrering vil man kunne bestemme parametrene og dermed kompensere for eventuelle feil. En fortegning er et avvik fra det perspektiviske samband og det totale avvik vises i formel (2.2). Det skilles mellom fire ulike fortegninger:

- 
- Radiell fortegning, ( $\Delta X_R$ )
  - Desentrerende fortegning, ( $\Delta X_D$ )
  - Fortegninger i planet, ( $\Delta X_I$ )
  - Fortegninger ut av planet, ( $\Delta X_U$ )

$$\Delta X = \Delta X_R + (\Delta X_D) + (\Delta X_I) + (\Delta X_U) \quad (2.2)$$

### 2.2.1 Radiell fortegning

Ved radiell linsefortegeting blir objektenes plassering på billedplanet forteget radielt nærmere eller lengre unna hovedpunktet. Man betegner den radielle fortegetingen som positiv hvis den ligger lengre unna hovedpunktet, mens man betegner den som negativ hvis den ligger nærmere hovedpunktet. I enkelte tilfeller vil den radielle fortegetingen være usymmetrisk om hovedpunktet. I slike tilfeller vil man kunne innføre et nytt punkt kalt det symmetriske prinsipal punktet (PPS). Avstanden mellom PPA og PPS er som oftest svært liten, og som nevnt tidligere vil man i de fleste tilfeller kun bruke PPA som hovedpunkt (Fraser, 1997; Fryer, 1996).

Den radielle fortegetingen forklares i fotogrammetrien som et polynom:

$$\Delta x = K_1 r^3 + K_2 r^5 + K_3 r^7 \quad (2.3)$$

Hvor  $K_i$  er koeffisienten for radiell fortegeting og  $r$  er den radielle avstanden fra hovedpunktet:

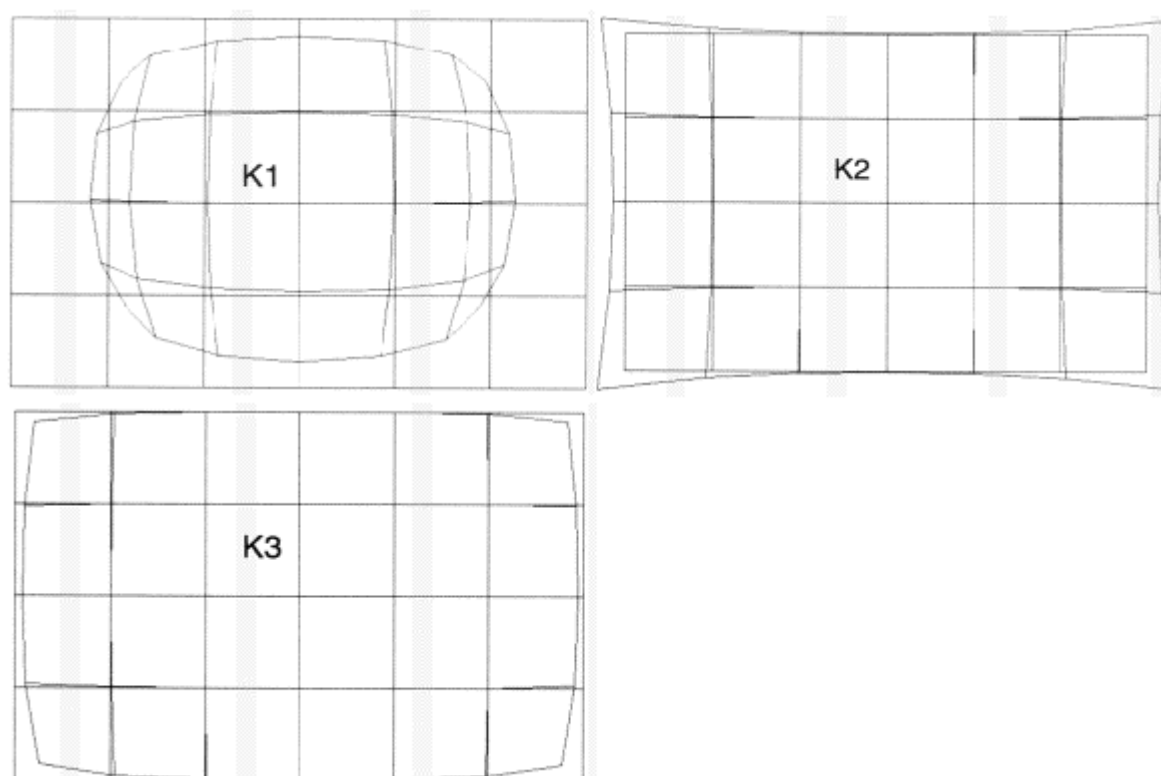
$$r^2 = (x - x_{pp})^2 + (y - y_{pp})^2 \quad (2.4)$$

Effekten av parameterne er vist i figur (2.2). Vanligvis vil  $K_1$  være tilstrekkelig for å forklare fortegetingen ved bruk av små format kameraer og ved begrensede nøyaktighetskrav. I tilfeller der man benytter linser med vidvinkel eller der det stilles

---

høye krav til nøyaktighet vil det være nødvendig å innføre flere K'er. Hvor mange av koeffisientene som bør være med kan avgjøres ved å teste signifikans.

Når det gjelder korrelasjon er denne svært stor mellom koeffisientene for den radielle fortegningen, men disse ser ut til å korrelere svært lite med de andre parameterne i den indre og ytre geometrien i kameraet (Fryer, 1996). Overparameterisering vil derfor svært sjelden by på problemer når det kommer til defineringen av den radielle fortegningen.



*Figur 2.2: Effekten av de radielle fortegningsparameterne. Fra (Beyer, 1992).*

### Variasjoner i fokus og zoom

Variasjoner i prinspal distansen som følge av fokus og zoom, vil påvirke den radielle fortegningen. Ved å definere fortegningen ved to ulike prinspal distanser vil man kunne beregne radiell fortegning for alle prinspal distanser (Brown, 1971). Dette vil først og fremst ha betydning for målinger innenfor en distanse av 4 meter (Fryer et al, 1994). Variasjoner i den radielle fortegningen som følge av objekters distanse fra



---

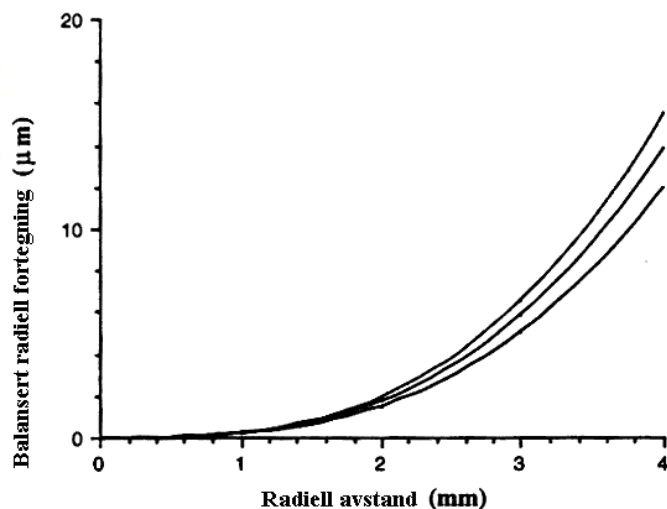
kameraposisjon vil ha størst betydning for avstander innenfor 15 ganger prinsipal distansen. For et kamera med prinsipal distanse under 20 mm, som er tilfelle for de fleste digitale kameraer, vil variasjonene derfor være svært små (Fraser, 1997).

### Gaussian radiell fortegning

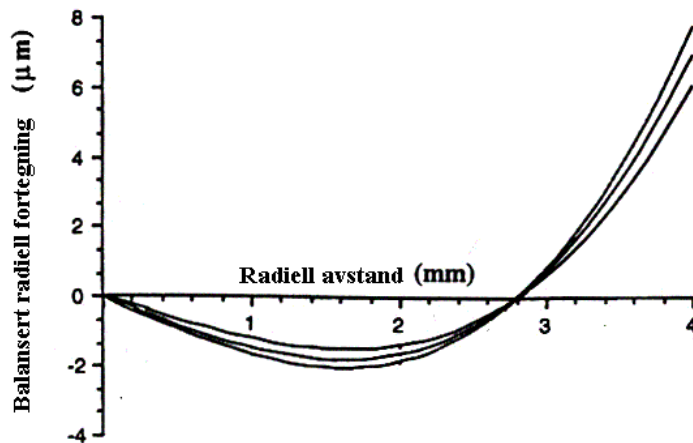
Gaussian radiell fortegning er betegnelsen på radiell fortegning sett i sammenheng med en bestemt kamera konstant. Figur 2.3 viser Gaussian radiell fortegning og hvordan fortegningen varierer med fokusering. Balansert Gaussian radiell fortegning (formel (2.5)) får man ved å skifte prinsipal distansen for å styre den radielle fortegningen.

$$\Delta x = K_0 r + K_1 r^3 + K_2 r^5 + K_3 r^7 \quad (2.5)$$

Dette kan sammenlignes med en tilting av X-aksen i diagrammet (figur 2.3 og 2.4). Dette har i utgangspunktet ingen matematiske fordeler, men blir av og til brukt fordi kurven ser bedre ut. Balansert Gaussian radiell fortegning blir blant annet brukt i programvaren Match-AT fra Inpho.



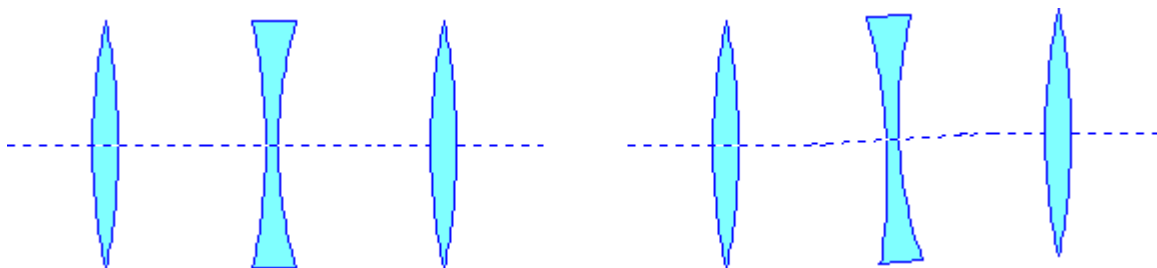
Figur 2.3: Gaussian radiell fortegning for tre fokussettinger. Fra (Fryer, 1996).



Figur 2.4: Balansert Gaussian radiell fortegning for tre fokussettinger. Fra (Fryer, 1996).

### 2.2.2 Desentrerende fortegning

I et perfekt linsesystem er elementene i systemet sentrert om den optiske aksen. Selv om kamera produsenten tar spesielt hensyn til sentreringen av linsene under produksjonen vil kameraet få en skjevhet mellom komponentene som forplanter seg gjennom kameraets linsesystem (figur 2.5). Dette danner grunnlaget for den andre formen for fortegning, desentrerende fortegning.



Figur 2.5: Desentrerende fortegning. Til høyre er komponentene i linsesystemet skjeve og skaper desentrerende fortegning . Fra (Fryer, 1996)

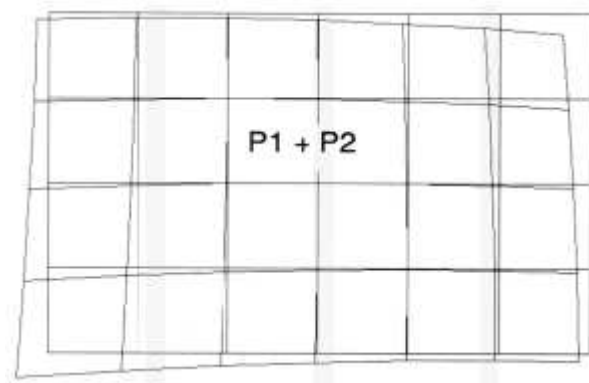
Desentrerende fortegning inneholder både en radiell og en tangentiell komponent (Brown, 1966). Vanligvis vil den desentrerende fortegningen utgjøre en mindre del av den totale fortegningen. De fleste linseprodusentene oppgir den desentrerende fortegningen til å være i størrelsesorden 1/10 av den radielle fortegningen, og den passerer sjelden 10  $\mu\text{m}$  (Fraser, 1997; Beamish, 1984). Parameterne P1 og P2 (figur 2.6) beskriver den desentrerende fortegningen og på samme måte som den radielle

---

fortegningen kan den desentrerende fortegningen vises i sammenheng med den radielle avstanden (formel (2.6)).

$$P(r) = (P_1^2 + P_2^2)^{1/2} r^2 \quad (2.6)$$

Desentrerende fortegning varierer i likehet med radiell fortegning ved bruk av fokus, men variasjonene er så små at de generelt blir oversett innen nærfotogrammetrien (Fraser, 1997).



*Figur 2.6: Effekten av den desentrerende fortegningen. Fra (Beyer, 1992).*

### 2.2.3 Fortegninger i planet

Et analogt kamera vil være utsatt for fortegninger i planet i form av deformasjon av filmen. Den mest vanligste formen er filmkrymping. Filmkrymping anses som en liten bidragsyter for systematiske feil. Hovedgrunnen til dette er at mesteparten av deformasjonen vil forsvinne under den konforme eller affine transformasjonen ved en indre orientering.

Digitale kameraer er også påvirket av fortegninger i planet. Forskjellig utforming av ccd-brikkene gjør at man av og til har piksler med ulik bredde og lengde, eller at ccd-brikken har en skjevhet. Ccd-brikken er digitalkameraets bildeplan, og består av et visst antall piksler som tar i mot lys i kameraet. Selv om pikslene skulle være fysisk geometrisk korrekt finnes det elektroniske aspekter som fører med seg en fortegning i planet. Blant disse er det verdt å nevne synkroniseringsfeil mellom ccd-brikken og mottakeren, som fører til ulike skalering mellom y- og x-aksen.

---

## 2.2.4 Fortegninger ut av planet

Det vil være mulig å modellere fortegninger i planet i under en kamera kalibrering ved hjelp av tileggsparametere. Dette er ikke tilfelle ved fortegninger ut av planet (Fraser, 1997). Systematiske feil grunnet ujevnheter i bildeplanet er en annen faktor som begrenser nøyaktigheten. Denne type fortegninger regnes for å være den mest begrensende faktoren for utnyttelse av digitale ikke metriske kameraer innen fotogrammetrien (Fraser, 1997). Hovedgrunnen er at fortegningen ikke lar seg modellere ved vanlige kalibreringsmetoder. For digitale kameraer med kort kamerakonstant utgjør dette et problem da fortegningen øker ved kortere kamerakonstant og større innfallsvinkel (Fryer og Brown, 1986).

I metriske kameraer er det vanlig å gjøre målinger direkte på bildeplanet, for deretter å modellere bildekoordinatene ved hjelp av polynomer. Når det gjelder tradisjonelle kalibreringsrutiner finnes det fortsatt ingen tilfredsstillende metode for å modellere ujevnheten på bildeplanet. Det er nødvendig å ha en forståelse for hvordan endringer i planet oppstår og hvor mye de utgjør. For analoge kameraer vil følgende uregelmessigheter kunne oppstå (Fryer, 1996):

- Variasjon i film tykkelse
- Ujevnheter i filmbakplaten
- Bulking av film

Hovedproblemet med analog film er at fortegningene vil kunne variere fra bilde til bilde, og i mange tilfeller vil det være umulig å gjenscape fotograferingsøyeblikket.

For digitale kameraer skiller vi mellom fysisk og elektronisk ujevnheter (Fraser, 1997). Ujevnheten i ccd-brikken oppgis sjelden av produsentene, men målinger utført blant annet av Fraser (1997) og Beyer (1992) har vist tildels oppløftende resultater. En 14x9 mm Kodak ccd-brikke viste seg å ha variasjoner i underkant av 0.3 mikrometer.

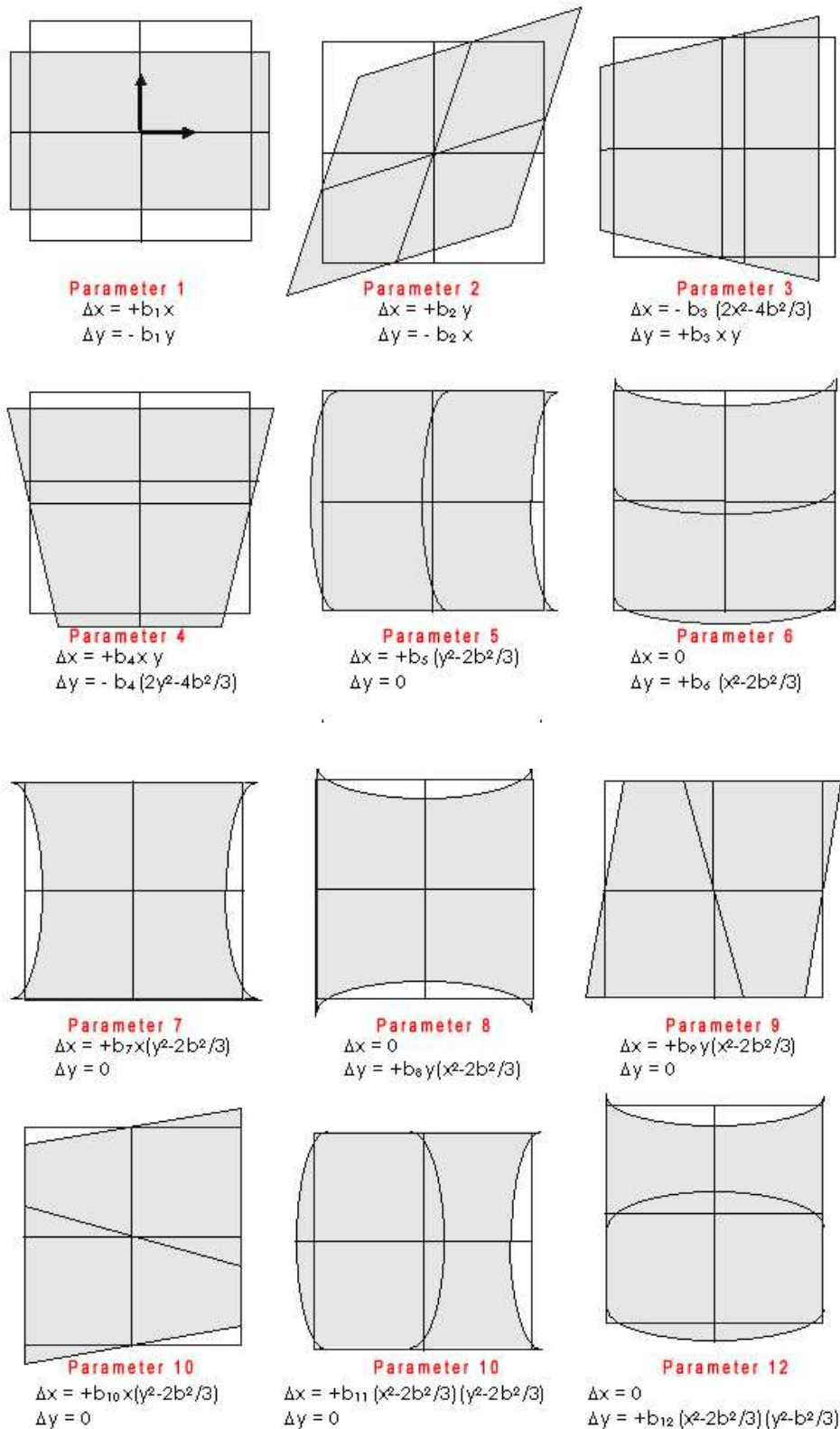
---

Utfordringen blir å beholde flatheten i ccd-brikken etter hvert som størrelsen på brikken øker.

## 2.3 Tilleggsparametre

Innføringen av strålebuntmetoden åpnet for nye muligheter innen kamera kalibrering. I løpet av den første halvdel av syttitallet utviklet Brown (1972) en metode for å løse ut kameraets fysiske parametre samtidig som objektets koordinater ble bestemt. Metoden ble løst ved at man innførte selvkalibreringsparametre, og er i dag kjent som selv-kalibrering (Clarke et al, 1998). Senere kom flere til med ulike parametersett for eksempel Ebner (1976) og Kilpela et al (1981). Videre i oppgaven vil betegnelsen tilleggsparemeter bli brukt.

Ved å innføre tilleggsparemeter som ukjente i beregningene, vil man kompensere for systematiske feil i bildene. For å få en god bestemmelse av tilleggsparemeterne er man avhengig av mange og gode kontrollpunkt. Hvis man ønsker å løse ut for mange tilleggsparemeter i forhold til hva kontrollpunktene tillater vil man forringe resultatet. Dette kalles overparametrisering (Andersen et al, 1994). For å vurdere hvilke av parameterne som beskriver systematiske feil, brukes signifikanstester. Hvis ikke signifikante parametre blir med i beregningene vil de i likhet med overparametrisering forverre resultatet.



Figur 2.7: Ebners matematiske tilleggsparemetere. Fra Ebner (1976) og Inpho (2003).

Vi skiller i hovedsak mellom to typer tilleggsparemetersett. Den ene er de fysiske, altså paremetersett som prøver å beskrive de fysiske egenskapene til et kamera. Blant

---

de fysiske parametersettene er Browns (1972) fysiske parametersett mest kjent (Kenefick et al, 1972). Formel 2.7 viser parametersettet som brukes i Nlhbunt (Norkart, 2000). Matematiske tilleggsparametere er den andre typen tilleggsparametere. De matematiske tilleggsparametere er oppbygd slik at parameterne korrelerer minst mulig med hverandre og den ytre orienteringen (Ebner, 1976). Mest kjent og mest brukt av disse er Ebners (1976) tilleggsparametere (figur 2.7), som blant annet er å finne i programvare som Image Station, Match-AT og NLHbunt.

$$\begin{aligned} Dx &= (x/c)t_1 + t_2 + t_4x + t_5r^2x + t_6r^4x + t_7x + t_8y + t_9xy + t_{10}y^2 \\ Dy &= (y/c)t_1 + t_3 + t_4y + t_5r^2y + t_6r^4y + t_{11}xy + t_{12}x^2 \end{aligned} \quad (2.7)$$

## 2.4 Ikke-metriske kameraer

I nærfotogrammetrien skilles det vanligvis mellom metriske og ikke-metriske kameraer. Et kamera som har en kjent og stabil indre geometri defineres som et metrisk kamera. Avstanden mellom projeksjonspunktet og sentrum i billedplanet (prinsipal distansen) er konstant, og justeres ofte slik at linsefortegningen blir minimal. I analoge metriske kameraer blir koordinatsystemet definert av diagonalene fra rammemerkene eller eventuelt andre markeringer i rammen som for eksempel reseau plate.

Fotogrammetrisk sett er et ikke-metrisk kamera definert som et kamera uten en kjent indre geometri. På tross av den ukjente geometrien kan man oppnå gode resultater ved bruk av et ikke-metrisk kamera til målingsoppdrag. Det siste tiåret har vi hatt en rivende utvikling innen produksjon av digitale kameraer, noe som har ført til at avanserte kameraer har blitt tilgjengelige til overkommelige priser. Som en følge av dette blir ikke-metriske kameraer nå også benyttet innen flyfotogrammetrien (Mostafa, 2004).

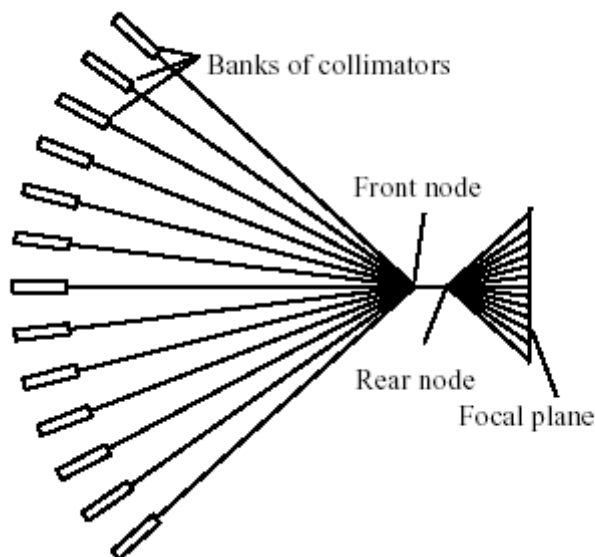
---

## 2.5 Metoder for kamera kalibrering

Innen flyfotogrammetrien er det vanlig å kalibrere kameraene under kontrollerte former i et kalibreringslaboratorium. Der utnytter man seg av avanserte instrument som goniometer eller multi kollimator. Disse metodene er kostbare og begrenses av et kameras stabilitet, derfor brukes normalt sett ikke disse metodene innen nærfotogrammetrien (Fryer, 1996).

### 2.5.1 Laboratorie metoder

En multi kollimator (figur 2.8) består to eller flere rekker med kollimatorer, oftest plassert i vifteform, der vinklene mellom kollimnatorene er kjente. Kolliminatorene avgir lys gjennom linsen og ned på bildeplanet. Siden vinklene mellom kolliminatorene er kjente vil eventuelle avvik på bildeplanet kunne måles av et teleskop plassert i bakkant av bildeplanet (Moffitt and Mikhail, 1995).



*Figur 2.8: Oversikt over multi-kollimator metoden. Fra Clarke og Fryer, (1998).*

I goniometeret beveges en kollimator og et teleskop i kjente posisjoner. Ved hjelp av en gridplate på bildeplanet måles fortegninger. Goniometer er i dag mye brukt ved kalibrering i flyfotogrammetrien, blant annet blir kameraet RC30 Leicas. De digitale



---

kameraene ZI-Imagings DMC og Leicas ADS40 blir også kalibrert ved hjelp av et goniometer, men denne kalibreringen blir ofte supplert med en selv-kalibrering (Cramer, 2004).

### **2.5.2 On-the-job**

I forbindelse med innføringen av strålebuntmetoden fant man nye muligheter for kamera kalibreringer, en av disse var on-the-job kalibrering. On-the-job kalibrering utnytter kjente kontrollpunkt i nærheten av eller på objektet som skal måles, til å beregne indre og ytre orientering samt nye punkt. Dette er spesielt gunstig for ikke-metriske kameraer, fordi dette eliminerer mulighetene for at svak stabilitet vil skape forskjeller i den indre geometrien mellom kalibrering og måleoppdrag. Som en følge av dette har on-the-job kalibrering blitt en av de mest vanlige kalibreringsteknikker innenfor nærfotogrammetrien (Clarke og Fryer, 1998). Ut fra størrelsen på objektet finnes det mange ulike metoder for å distribuere punktene i et bilde. For nærfotogrammetriske formål ønskes ofte en kontrollpunktnøyaktighet på submillimeter nivå. Innmåling og vedlikehold av slike kontrollpunkter er vanskelig og tidkrevende, og derfor brukes ofte solide rammer med kjent geometri og godt markerte og bestemte kontrollpunkt. For litt større objekter kan man for eksempel bruke stativ med staker med kjente punkt. On-the-job kalibrering blir også utnyttet i flyfotogrammetrien, ved bruk av signalerte kjente punkt (Clarke og Fryer, 1998).

### **2.5.3 Selv-kalibrering**

På samme måte som on-the-job kalibrering, utnytter selv-kalibrering observasjoner fra måleoppdraget til å beregne kalibreringsparameterne. I denne metoden benytter man seg av punkter på selve objektet og en løsning av ligningene bestemmer både objektets koordinater og kalibreringsparameterne i den samme prosessen. Forskjellen på on-the-job kalibrering og selv-kalibrering ligger i at man ved en selv-kalibrering ikke nødvendigvis kjenner punktenes koordinater i måleobjektets koordinatsystem. I stedet benytter man seg av ukjente pass punkt, og foretar en relativkalibrering. Men

---

hvis man innfører kjente koordinater har man mulighet til å beregne fotostasjonenes ytre orientering.

#### **2.5.4 Loddlinje kalibrering**

Prinsippet ved loddlinje kalibrering er at en rett linje vil, hvis vi ser bort i fra fortegning, projiseres som en rett linje i bildeplanet. Det målte avviket vil skyldes radiell og desentrerende fortegning. Metoden egner seg ikke til bestemmelse av hovedpunkt og kamera konstant, men til gjengjeld får man en god bestemmelse av fortegningsparameterne. Metoden ble utviklet av Brown på begynnelsen av syttitallet (Brown, 1971) og videre utviklet i forbindelse med at man i den senere tid har utviklet metoder for automatisk gjenkjenning av linjeobjekter i bildet (Brown og Fryer, 1986). I praksis holder det å definere parvise  $x$  og  $y$  koordinater som beskriver de rette linjene. Det spiller ingen rolle om linjene i kalibreringen er vertikale eller horisontale.

#### **2.5.5 Stellar-calibration**

Posisjonen til stjerner er kjent med nøyaktighet og pålitelighet høy nok for kalibrering av kameraer. Ved å etablere flere stasjoner og eksponere himmelen kan flere tusen stjerner bli synlige. Det er viktig med mange stjerner for å kunne korrigere for atmosfæriske forstyrrelser (Clarke og Fryer, 1998). Posisjonene til stjernene kan man laste ned på Internett.

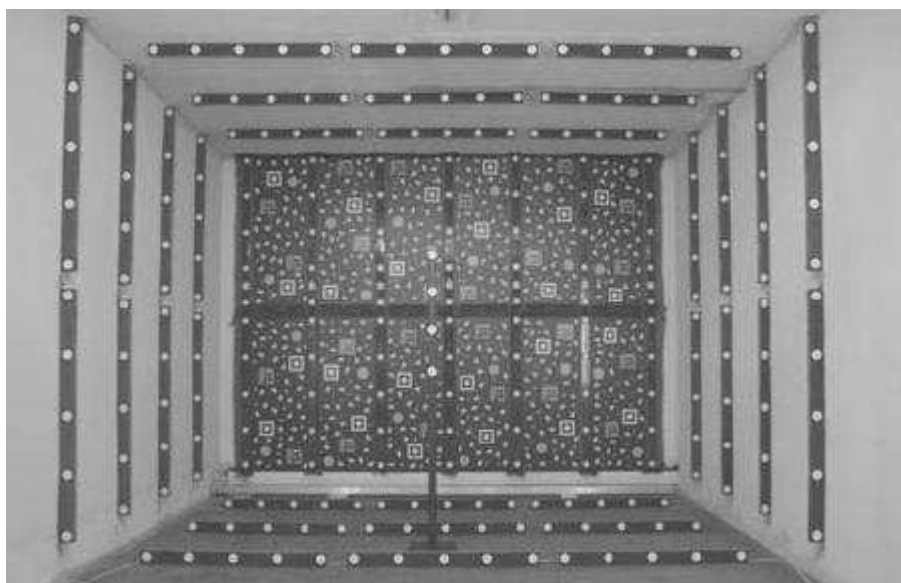
Allikevel blir metoden ansett som tungvinn siden det vil være tidkrevende å gjenkjenne stjernene under måling i bildene. Metoden var en del brukt på syttitallet i forbindelse med innføringen av selv-kalibrering (Brown, 1971).

#### **2.5.6 Testfeltkalibrering**

I tradisjonell testfelts kalibrering utføres fotografering av et testfelt med kjente kontrollpunkt. Disse punktene er enten plassert på en flate, eller de er plassert i rommet, et såkalt romlig testfelt, der passpunktene er plassert for eksempel på stenger

---

i rommet. Et slikt testfelt vil nok også skape problemer. Relativ forflytning av de nøyaktig innmålte passpunktene er et av problemene som bør tas i betraktning, i hvert fall for et testfelt som skal være operativt over en lengre periode. En annen unøyaktighet er metoden som blir brukt for å koordinatfeste passpunktene, innmåling ved bruk av totalstasjon eller elektronisk avstandsmåler kan være vanskelig. Antall passpunkter er en viktig faktor for å oppnå et godt kalibrerings resultat. Naturligvis vil kvaliteten på kalibreringen stige når antallet passpunkt økes, og normalt brukes mellom 30 og 100 passpunkt (Fryer, 1996). Testfelt kalibrering blir i dag noe utnyttet innenfor flyfotogrammetrien, der man antar at den indre geometrien vil kunne holde seg mer eller mindre stabil. Vexcel kameraet Ultracamd blir kalibrert i et rommelig testfelt (figur 2.9) (Kröpfl et al, 2004), det samme gjelder for en del av de typiske mellom format kameraene, som for eksempel Applanix DSS (Mostafa, 2004).



*Figur 2.9: Testfeltet som brukes av Vexcel, fra (Kröpfl et al, 2004).*

### **2.5.7 Automatiske kalibreringsmetoder**

Utviklingen av billedbehandlingsprogrammer og digitale kameraer har skapt et potensiale for såkalte desktop visualiseringssystemer. Dette er programmer som sikter seg inn på det kommersielle massemarkedet innen billedbehandling og kamerakalibrering. Programmene tar utgangspunkt i matematiske modeller, og måler

---

bildekoordinatene selv. Photomodeler og Matlab camera calibrator er eksempler på slike programmer som tilbyr kamerakalibrering. Selv om de matematiske modellene varierer fra program til program er prinsippene for fremgangsmåten de samme. Utgangspunktet for de automatiske metodene er et testfelt bestående av sirkler, trekanter eller firkanter. Avhengig av størrelsen på objektet skrives eller plottes testfeltet ut i en passende skala. Deretter plasseres testfeltet på en plan overflate, for eksempel en vegg eller et gulv. Nå kan bilder opptas av den plane overflaten fra ulike orienteringer, altså det opptas konvergente bilder av planet. Det spiller ingen rolle om planet eller kameraet flyttes, men for å gjøre det enkelt blir det her tatt utgangspunkt i at kameraet flyttes, mens planet forblir i sin posisjon. Bevegelsene til kameraet skal ikke være kjent, man tar i stedet utgangspunkt i avstanden mellom to kontroll objekt på testfeltet, evt. dimensjonen på objektene i testfeltet. Programmet vil påfølgende foreta en automatisk måling ved hjelp av bildekorrelasjon, for deretter å kunne måle de enkelte billedkoordinater på sub piksel nivå. Fordelene ved bruken av automatiske kalibreringsmetoder er først og fremst at det er raskt og effektivt å gjennomføre kalibreringen. Man unngår unøyaktigheter som oppstår ved etablering og vedlikehold av et tradisjonelt testfelt (Sørensen et al, 2001).

---

### 3. Metode

To kalibreringsmetoder ble utprøvd:

- Testfelt kalibrering i Nlhunt
- Kalibrering i Photodeler

Nøyaktighetsgevinsten av kalibreringsmetodene skal bedømmes ved å tilbakeføre parameterne fra kalibreringene til ISDM. Deretter gjennomføres en ny beregning av testfeltsblokken. Image Station er den mest brukte fotogrammetriske programvaren på instituttet og det vil derfor være naturlig å bedømme kalibreringsrutinene i Photodeler og Nlhunt ved å innføre de kalibrerte data i denne programvaren.

#### 3.1 Kalibrering i Nlhunt

Nlhunt er et program for strålebuntutjevning utviklet ved Universitet for miljø og biokjemi. Programmet brukes i dag innen flyfotogrammetri, og er spesielt godt egnet for blokkutjevning og GPS støttede beregninger (Norkart, 2000). Nlhunt har også støtte for beregninger av systematiske feil, både matematiske og fysiske parametersett kan innføres i en beregning.

Med utgangspunkt i testfeltet ble kalibreringer av de to kameraene gjennomført i Nlhunt. Bildemålingene og kontrollpunkt fra Image Station ble overført til Nlhunt på Bingo formatet og i Nlhunt ble fysiske tilleggsparemetere valgt. I Nlhunt er det ikke mulig å løse den radielle fortegningen og kamerakonstanten samtidig. Dette begrunnes i at de to parameterne  $K_1$  og  $C$  er totalt korrelert (Norkart, 2000).

Dette kan løses med iterative metoder i Nlhunt eller utnytte seg av kamera kalibreringsfunksjonen i Image station. Ved å gjøre en kamerakalibrering i Image station der man samtidig tar med de av Ebners tilleggsparemetere som etterligner den radielle fortegningen, vil man kunne få en godt estimat av kamerakonstanten. I

---

resultatene i denne oppgaven er det brukt kamerakonstant estimert i kamerakalibreringen i Image station. Derfor ble kamera konstanten låst i Nlhbunt, mens de resterende parameterne ble med i beregningen. Etter første gjennomkjøring ble parameterens signifikans vurdert ut fra forholdet mellom parameter verdien og standardavviket til parameteren. Parametere som ble vurdert som ikke signifikante ble tatt ut av kalibreringen og en ny beregning ble foretatt. Mellom hver beregning ble resultatfilen kontrollert for endring i restfeilene i kontrollpunktene og for endringer i den ytre orienteringen. Etter at alle ikke signifikante parametere er tatt ut, er kalibreringen fullført.

### 3.1.1 Testfeltet

Testfeltet ble brukt både til å beregne tileggsparametere i Nlhbunt og som grunnlag for nøyaktighetsvurderingen.



*Figur 3.1: Oversiktsbilde av testfeltet. Foto: T.Odberg 090106.*

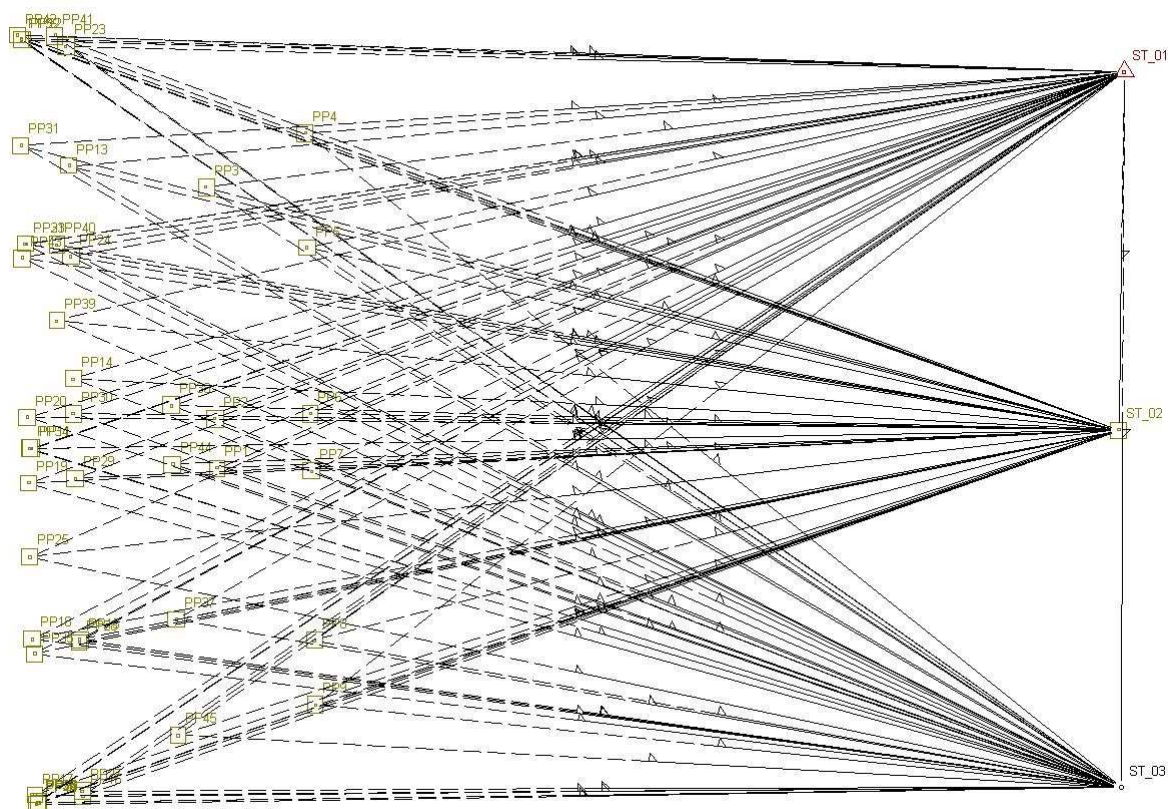
#### Geometrisk utforming og etablering av testfeltet

Testfeltet ble etablert i et lagerrom (figur 3.1) i en kjeller på Universitetet i Oslo. Rommet inneholder rørgater og gamle ubrukte hyller, noe som danner grunnlaget for et romlig testfelt. Dybden på testfeltet fra den ytre rørgaten til veggen (bunnen) er ca 1,4 meter. Foto og målestasjonene ble bestemt ved å bore feste og måle merker i

---

betonggulvet. Denne løsningen er god nok for et midlertidig testfelt, fordi den gir stabile og gode fotostasjoner. Fotostasjonene ble etablert på den lengste avstanden som var mulig, det vil si at rommet er stort nok til at fotostasjonene kommer på en avstand av 5 meter fra bunnen av testfeltet.

Utformingen av signalene som markerer kontrollpunktene er en viktig faktor for suksessfulle målinger. Dette gjelder både for innmålingen og for bildemålingene i etterkant. Signalet består av en refleksiv overflate med en større og en mindre sirkel, dette gjør signalene spesielt godt egnet til innmåling med totalstasjon. Signalets synlighet i bildene vil naturlig nok avhenge av avstand til fotostasjon og oppløsningen i bildene. Utsetting av punkt ble gjennomført ved å sette Hasselblad kameraet opp i stasjon 2, den midtre stasjonen, deretter ble reflektorene fordelt i innenfor siktefeltet til kameraet. På denne måten får kontrollpunktene en tilfeldig plassering samtidig som spredningen og utnyttelsen av punktene blir maksimal. Innmålingen av signalene ble gjort med en totalstasjon av typen Sokkia med elektronisk avstandsmåler. Totalstasjonen ble satt opp over de tre stasjonspunktene slik at disse også kunne beregnes. Det ble målt fire hel-satser i de tre stasjonene, noe som ut i fra forholdene skulle gi en god bestemmelse av kontrollpunktene. Beregninger av kontrollpunktens koordinater ble gjort i Vg-land (figur 3.2).



*Figur 3.2: Beregningen av testfeltet i Vg-land.*

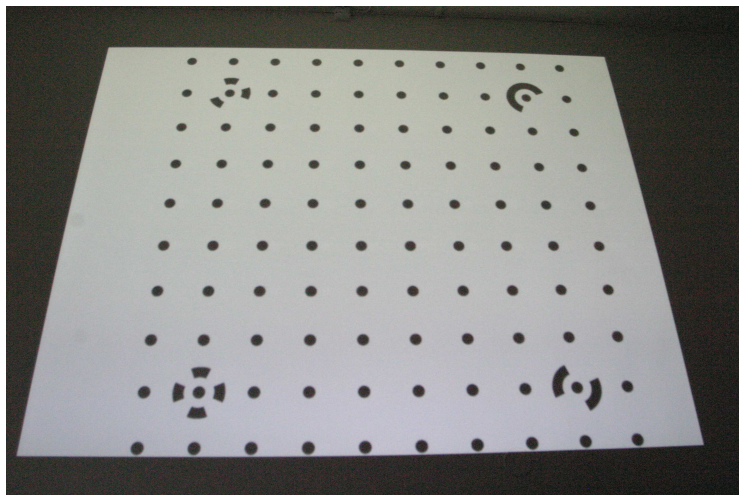
Det lokale koordinatsystemet ble laget ved å sette stasjon 1 som origo i et system der y-aksens positive akse passerer stasjon 3, mens x-aksen har positiv retning mot kontrollpunktene. Z-aksen er som normalt høyden. Ved å bruke de elektroniske avstandsmålingene fra stasjon 1 til stasjon 3 er det nå bestemt et punkt kjent i x, y og z (stasjon 1) og et punkt kjent i grunnriss (stasjon 3). Dette dannet grunnlaget for utjevningen som er vist i resultatet, kapittel 4. Resultatet er en liste over kontrollpunkt, med et koordinatsystem tilpasset innmålingen og utjevningen. For å tilpasse og klargjøre kontrollpunktlisten for bildemålinger ble x-aksen satt som z-akse, y-aksen som x-akse og z-aksen som y-akse. På denne måten ble testfeltet i samme aksesystem som bildene. Tilslutt ble det lagt til 10 meter på z-aksen slik at det nå ble operert med utesluttende positive høyder. Den ferdige koordinatlisten finnes i kapittel 4 (tabell 4.1).



---

## 3.2 Kalibrering i Photomodeler

Camera calibrator er kalibreringsfunksjonen i Photomodeler. Camera calibrator utnytter parametersettet utviklet og tatt i bruk av Brown (1971), og således er den matematiske bakgrunnen kjent. Det plane kalibreringsfeltet (figur 3.3) består av sirkelformede signaler. Ingen av signalene er absolutt kjente, og dette fører til at feltet kan forstørres og forminskes etter behov og formål. Siden programmet utnytter seg av den relative plasseringen av punktene, vil man kunne projisere testfeltet i en projektor uten å ta hensyn til eventuelle linse feil i projektoren. For å oppnå dybde i målingene utnytter Camera calibrator seg av konvergente opptak. Ved å ta "skråbilder" fra flere kanter og dreie kameraet  $90^\circ$  (kappa) ved noen av stasjonene oppnår man en god nettverkskonfigurasjon. Siden den indre geometrien faktisk er absolutt, er kalibreringsrutinene avhengig av noen bestemte størrelser. Dette oppnår Camera calibrator ved å utnytte seg av egenskapene (metadataene) til det digitale bildet. Bildene fra et digitalt kamera inneholder egenskaps data som brennvidde (exif focal length) og ccd'ens lengde og bredde, og ut fra dette beregner photomodeler seg frem til absolutte mål på den indre geometrien (EOS, 2003).



*Figur 3.3: Photomodelers testfelt. Foto: T. Odberg 090106*

Ved å innføre parameterne fra Photomodeler til en beregning av testfeltet vil man kunne se hvilket potensialet og ikke minst hvilken presisjon kalibreringen i Photomodeler har. Det ble også gjennomført en serie kalibreringer i Photomodeler

---

med den hensikt å avsløre variasjoner i kameraets indre geometri. Photomodeler kan også brukes til selvkalibrering i testfeltet (figur 3.1), som igjen vil kunne brukes som supplerende sammenligningsgrunnlag.

---

## 4. Gjennomføring og Resultater

### 4.1 Kalibrering i Nlhbunt

#### Testfeltet

Resultatet fra innmålingen av testfeltet vises i tabell (4.1). Standardavviket ligger under 0,5 mm. Standardavviket gir størst utslag i Z, skyldes begrenset nøyaktighet i den elektroniske avstandsmåleren. Den elektroniske avstandsmåleren måler tiden lyset bruker fra totalstasjonen til de refleksive målemerkene og tilbake til totalstasjonen. Problemet er at alle refleksmerkene ikke kan stå normalt på lyset fra den elektroniske avstandsmåleren. Dermed oppstår det en tidsforsinkelse når vinkelen mellom totalstasjonen og signalene blir stor.

Resultatet er som forventet og stemmer overens med hva som er oppnådd i andre tilfeller der totalstasjoner er brukt til innmålingen av testfelt (Ahmad og Chandler, 1999). På grunnlag av dette blir derfor innmålingen av kontrollpunktene ansett som godt nok for det fotogrammetriske nettverket som legges til grunn for kalibreringen.

*Tabell 4.1: Kontrollpunktliste med standardavvik (cm), aksene samsvarer her med bildets koordinatsystem.*

Punkt	X	Y	Z	$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\sigma_z$
PP1	191,338	301,777	571,355	0,034	0,028	0,042
PP2	168,103	301,732	570,212	0,034	0,028	0,042
PP3	58,313	301,92	565,149	0,035	0,028	0,042
PP4	32,241	254,42	611,773	0,034	0,028	0,041
PP5	86,469	255,036	613,262	0,034	0,028	0,04
PP6	165,133	255,068	615,467	0,034	0,028	0,041
PP7	192,25	254,676	616,248	0,034	0,028	0,041
PP8	272,615	254,783	618,181	0,035	0,028	0,042
PP9	303,081	254,888	618,972	0,035	0,028	0,043
PP10	350,326	247,192	488,042	0,038	0,028	0,047
PP11	182,719	247,422	482,998	0,037	0,028	0,044
PP12	-11,089	247,2	477,086	0,039	0,028	0,045
PP13	48,605	221,072	499,945	0,037	0,028	0,044
PP14	149,668	220,925	502,9	0,036	0,028	0,043
PP15	273,318	221,286	506,889	0,037	0,028	0,045
PP16	347,188	221,02	508,898	0,038	0,028	0,046
PP17	346,949	214,205	486,375	0,038	0,028	0,047
PP18	273,035	213,204	484,292	0,038	0,028	0,045
PP19	199,115	213,694	481,995	0,037	0,028	0,044
PP20	168,145	214,005	481,117	0,037	0,028	0,044
PP21	85,754	217,226	479,859	0,038	0,028	0,044
PP22	-10,922	216,832	477,089	0,039	0,028	0,045
PP23	-8,032	188,158	498,074	0,038	0,028	0,044
PP24	91,614	188,108	501,185	0,037	0,028	0,043
PP25	234,138	178,709	482,751	-	0,028	-
PP26	350,468	181,014	487,794	0,039	0,028	0,047
PP27	344,739	154,879	508,629	0,038	0,028	0,046
PP28	274,235	154,887	506,661	0,037	0,028	0,045
PP29	196,82	154,857	504,175	0,036	0,028	0,044
PP30	166,073	154,728	503,099	0,036	0,028	0,044
PP31	39,292	153,878	477,042	0,038	0,028	0,044
PP32	-10,772	127,346	476,837	0,039	0,028	0,045
PP33	85,892	127,329	479,539	0,038	0,028	0,044
PP34	182,646	127,12	482,355	0,037	0,028	0,044
PP35	280,012	129,796	485,611	0,038	0,028	0,045
PP36	350,269	105,968	487,542	0,038	0,028	0,047
PP37	263,122	77,623	552,586	0,035	0,028	0,044
PP38	161,777	77,092	549,384	0,035	0,028	0,042
PP39	122,199	57,191	494,741	0,036	0,028	0,044
PP40	86,149	56,787	494,416	0,037	0,028	0,044
PP41	-12,883	59,481	492,687	0,038	0,028	0,045
PP42	-12,957	9,294	474,957	0,038	0,028	0,045
PP43	92,645	8,342	477,984	0,037	0,028	0,044
PP44	189,767	7,053	550,256	0,034	0,028	0,043
PP45	318,134	7,453	553,737	0,035	0,028	0,045
PP46	351,293	27,788	487,14	0,041	0,035	0,059

---

## Kalibreringen

Kalibreringen i Nlhunt ble basert på fotografering av testfeltet og ble gjennomført både på Hasselblad og Canon kameraet (tabell 4.2).

De tre fotostasjonene som ble brukt til å eksponere testfeltet er plassert over de samme punktene som ble brukt ved innmålingen av testfeltet. Dette er valgt fordi det gir en viss kontroll over projeksjonssenterets posisjon i eksponeringsøyeblikket. Det vil være et ukjent offset mellom innmålingspunktet og kameraets projeksjonssenter. Allikevel vil man kunne sammenligne projeksjonssentrene med den beregnede ytre orienteringen for å vurdere kvaliteten av kalibreringen.

Bildemålinger ble gjort i programvaren Image Station og Match-AT. Fordelen med å gjøre bilde målingene i to ulike programmer, er at man har bedre kontroll over målefeil og systematiske feil. Dette skyldes i hovedsak at programmene produserer ulik statistikk i etterkant av en beregning og at programmene utnytter seg av forskjellige typer tilleggsparametere. I tillegg får man to uavhengige sett med målinger.

I analysen av bildemålingene ble Ebners (1976) tilleggsparametersett brukt aktivt for å bedømme resultatet av beregningen, noen av parameterne har typiske likheter med ”fysiske” systematiske feil (figur 2.7). Etter at kalibreringen fra Nlhunt var tilbake ført til testfeltet var det et mål at de systematiske feilene skulle være så små som mulig.

### **Kalibrering av Canon kameraet med et utvidet testfelt**

For Canon kameraet er testfeltet utvidet med to fotostasjoner, for en utdypende diskusjon rundt dette henvises det til diskusjonen. Det vil si at testfeltet for kalibreringen av Canon kameraet bestod av fem fotostasjoner, der to av stasjonene var plassert to meter bak de originale fotostasjonene. Resultatet fra kalibreringen av Canon kameraet viser at den ytre orienteringen holder seg stabil på tilnærmet riktig Z

---

verdi gjennom hele prosessen. Tabell 4.2 viser resultatet fra kalibreringen i Nlhbunt av Hasselblad kameraet og Canon kameraet.

*Tabell 4.2: Resultat av testfelt kalibreringen i Nlhbunt.*

Parameter	Type parameter	Hasselblad	Canon
C	Prinsipal distansen	61,2	20,08
Xp	Hovedpunkt	-0,17	ikke signifikant
Yp	Hovedpunkt	0,36	0,2
K1	Radiell fortegning	-7,50E-03	2,83E-02
K2	Radiell fortegning	-1,80E-05	3,30E-04
K3	Radiell fortegning	4,50E-09	6,28E-07
P1	Desentrerende fortegning	ikke signifikant	5,99E-05
P2	Desentrerende fortegning	ikke signifikant	-4,65E-05

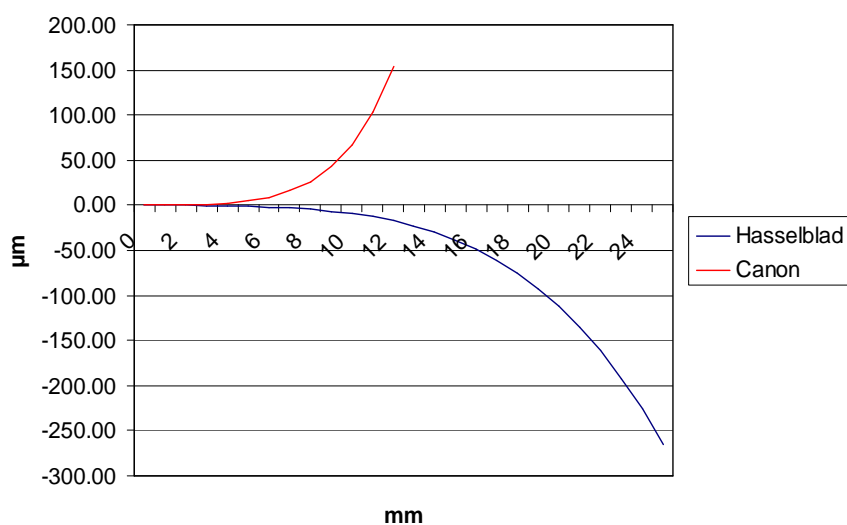
### **Kalibrering av Hasselblad kameraet i det originale testfeltet**

Hasselblad kameraet ble kalibrert i det originale testfeltet det vil si ved bruk av tre fotostasjoner. Resultatfilen fra kalibreringen av Hasselblad kameraet viser at den ytre orienteringen forskyves vekk fra testfeltet, en rekke gjennomkjøringer ble gjort med det samme resultatet (tabell 4.3). Ved å forandre på kamera konstanten ble det observert en forflytning av den ytre orienteringen. Resultatet viser en Z- verdi som er omtrent 20 cm feil, det er tydelig at denne feilen stammer fra en feil i den indre orienteringen. Resultatet i de andre ytre orienteringsparameterne er også verdt å merke seg, disse stemmer heller ikke helt overens med de antatte verdiene. Hasselblad kameraet skal ha en fast brennvidde på 60 mm, derfor er det verdt å merke seg kalibreringsresultatet for kamera konstanten til Hasselblad kameraet.

*Tabell 4.3: Ytre orientering etter gjennomført kalibrering med Hasselblad kameraet. Antatt verdi for Z skal være i underkant av 1000 cm.*

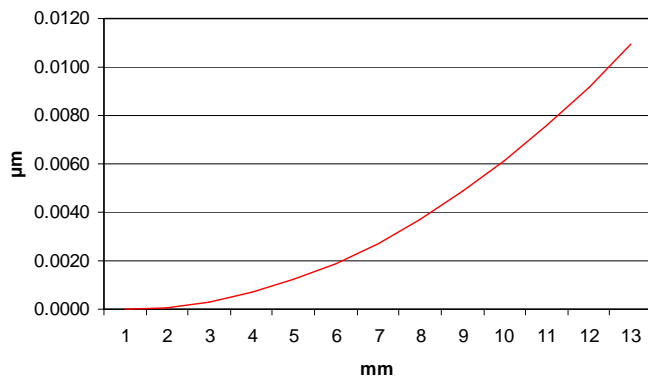
Image	X	Y	Z	Phi	Omega	Kappa
1	9,975 1,445	164,692 1,182	1017,181 2,395	4,789 0,1683	0,7837 0,1497	399,6273 0,0608
2	-169,561 1,057	166,357 1,108	1016,761 2,515	1,9838 0,1204	0,0948 0,1367	399,5003 0,0515
3	-347,727 1,318	169,626 1,146	1017,155 2,374	399,1041 0,1652	0,1253 0,1466	399,5141 0,0616

Figur 4.1 viser Gaussian radiell fortegning. Dette gir et bedre inntrykk av hvordan fortegningene påvirker kameraene. Det er viktig å merke seg at beregningene av den radielle fortegningen er beregnet med ulike forutsetninger for de to kameraene.



*Figur 4.1: Radiell fortegning i mikrometer sett i sammenheng med radiell avstand fra hovedpunktet for Hasselblad og Canon.*

For Hasselblad kameraet er den desentrerende fortegningen ikke signifikant (tabell 4.2), sannsynligvis absorbert av hovedpunktet eller av den ytre orienteringens x og y verdier (tabell 4.3). Den desentrerende fortegningen til Canon kameraet (figur 4.2) er som forventet betydelig mindre enn den radielle fortegningen (figur 4.1).



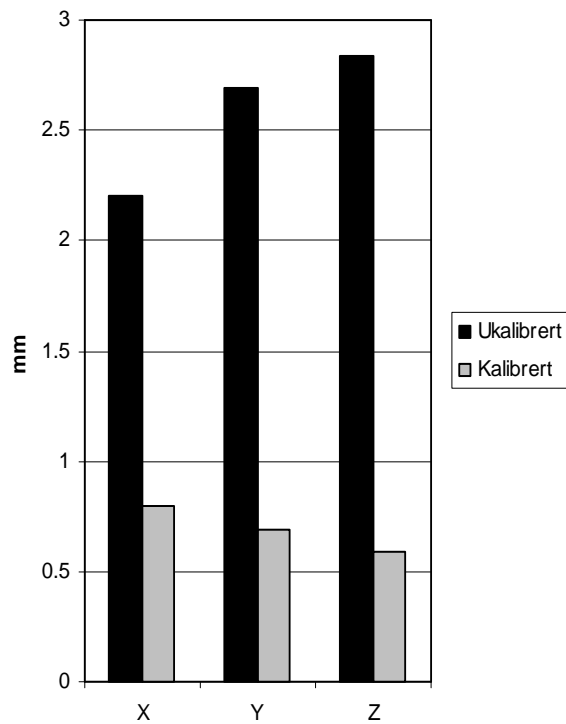
*Figur 4.2: Desentrerende fortegning for Canon kameraet. Figuren viser fortegningen i mikrometer sett i sammenheng med den radielle avstanden.*

### Forbedringspotensialet

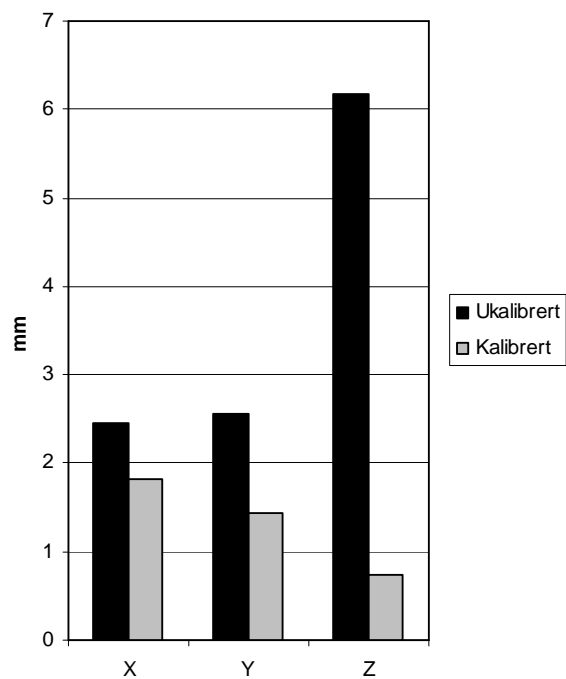
For å kunne vurdere hvilken effekt kalibreringsresultatet har for punkt nøyaktighet og for bildemålingene i Image Station, ble det laget en ny oppdatert kamera fil for hvert av kameraene. Deretter ble det gjort en beregning for å se om kalibreringsparameterne utgjorde noen forskjell. Forskjellen mellom kalibrerte og ukalibrerte målinger er vist i figur 4.3-4.5.

Figur 4.3 viser nøyaktighetsforbedringen for Canon kameraet. Canon kameraet viser seg å ha et stort forbedringspotensial ved kalibrering. Forbedringene er like store i alle retninger og utgjør over 2 mm.





Figur 4.3: Nøyaktighet (RMS) før og etter kalibrering for Canon Kameraet.

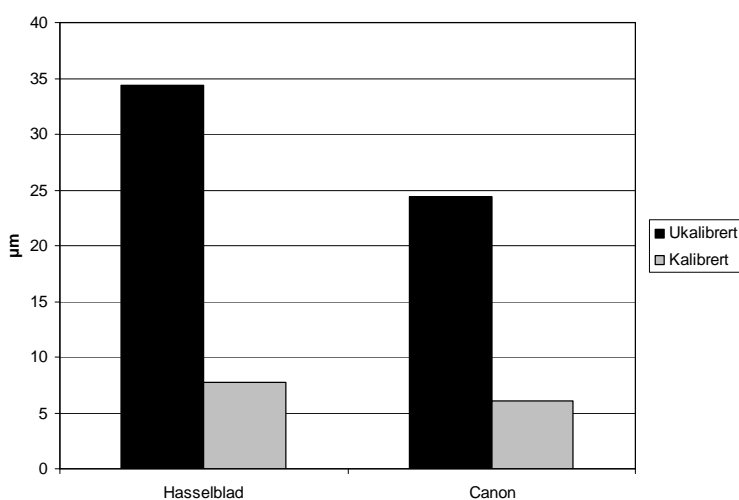


Figur 4.4: Nøyaktighet (RMS) før og etter kalibrering for Hasselbladkameraet.

---

Hasselblad kameraet viser et enda større forbedringspotensial (figur 4.4), men viser også en høyere RMS enn Canon kameraet. Dessuten er det Z verdien som gir det største utslaget, dette kan sees i sammenheng med utslaget i Z verdien i den ytre orienteringen.

Standardavviket i bilde målingene målt i mikrometer ble sammenlignet før og etter kalibrering. Resultatet viser forbedringer både for Hasselblad kameraet og for Canon kameraet. I likhet med de foregående figurene (figur 4.3 og figur 4.4) er det Canon kameraet som oppnår det beste resultatet mens Hasselblad kameraet oppnår den største forbedringen. Den resterende standardavviket, etter at kalibreringsdataene var innført, var forventet i underkant av 5  $\mu\text{m}$ , men på grunn av unøyaktige målinger er dette ikke tilfelle. Allikevel viser figurene (figur 4.3-4.5) at kamera kalibreringene forbedrer nøyaktigheten betraktelig.



*Figur 4.5: Standardavviket i bildemålingene før og etter kalibrering for begge kameraene.*

## 4.2 Kalibrering i Photomodeler

Kalibrering i Photomodeler ble kun utført på Canon kameraet. Det ble gjort forsøk med Hasselbladet, men på grunn av dårlig lyssetting under eksponeringen ville ikke de skannede Hasselblad bildene la seg kalibrere.

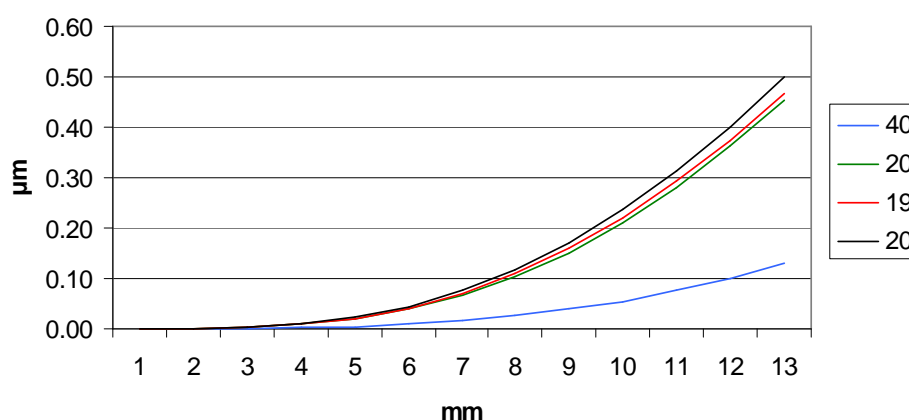
---

## Photomodeler kalibrering av Canon kameraet

I Photomodeler ble det gjennomført en serie målinger der fokus og zoom ble variert (figur 4.6-4.8). Fra teorien vet vi at hovedpunktet og den radielle og desentrerende fortegningen varierer som følge av endring i kamera konstanten. Variasjonene i fokus og zoom fører til en endring i kamera konstanten, derfor ble kamera konstanten valgt som utgangspunkt for sammenligningene. Følgende kamera innstillinger ble gjort:

- Kamera konstant 19 mm : kameraet er satt i ytre fokus
- Kamera konstant 40 mm : Zoom er tatt i bruk
- Kamera konstant 20 mm : kameraet er satt i samme fokus som ved Nlhbunt kalibreringen
- Kamera konstant 20 mm : kameraet re fokuseres til tilnærmet samme verdi som ved forrige punkt

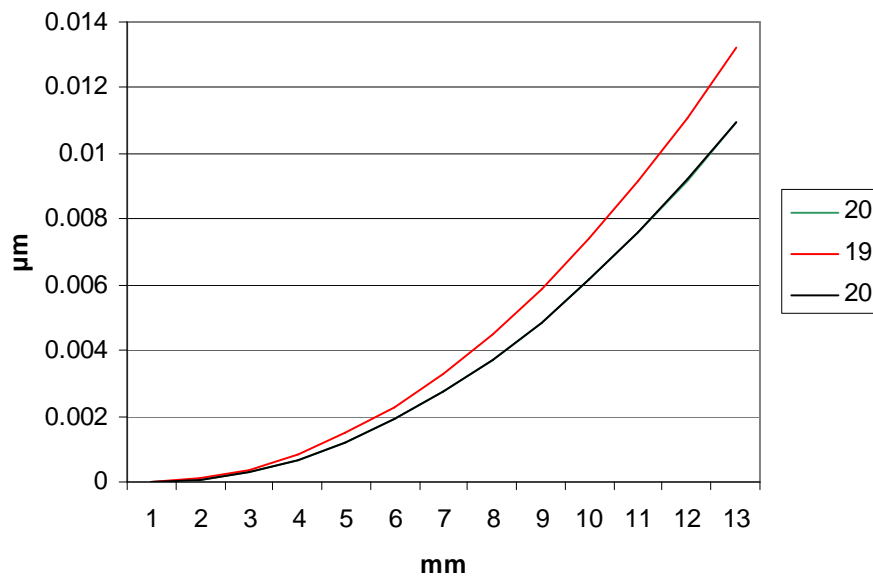
Figur 4.6 viser små endringer i den radielle fortegningen ved bruk av fokus. Bruken av zoom gir et betydelig utslag i den radielle fortegningen. Resultatene i Photomodeler viser en betydelig lavere andel fortegning enn resultatene i Nlhbunt (Figur 4.6).



*Figur 4.6: Radiell fortegning for varierende fokus og zoom i Canon kameraet.*

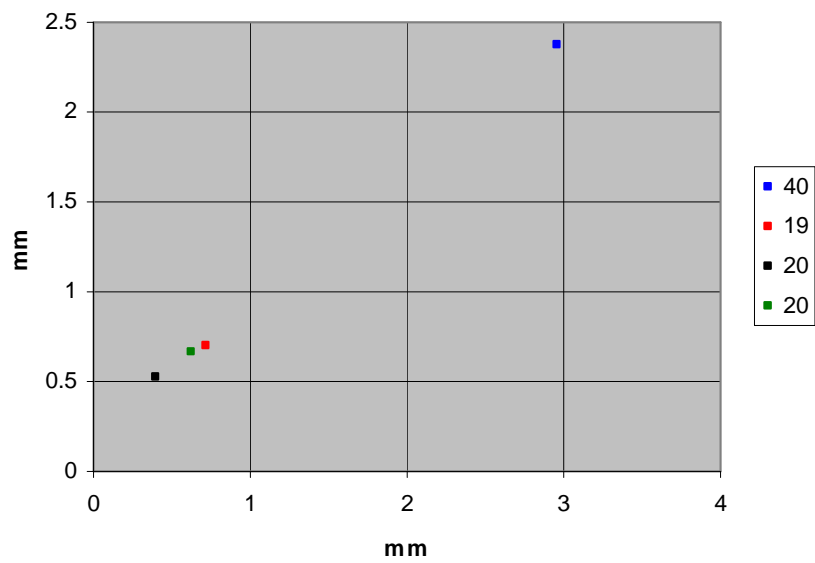
---

Resultatet av kalibreringen i Photomodeler viser at den desentrerende fortegningen varierer i liten grad som følge av fokus endringer (figur 4.7). Den desentrerende fortegningen er som ved Nlhbunt kalibreringen svært liten.



*Figur 4.7: Desentrerende fortegning for varierende fokus i Canon kameraet.*

Figur 4.8 viser at hovedpunktet forflyttes ved bruk av zoom eller ved endring av fokus. I likhet med den radielle fortegningen er det først og fremst zoom endringer som bidrar til den største forskjellen. Fokusering vil bare i liten grad påvirke hovedpunktets plassering.



*Figur 4.8: Endring i hovedpunkt som følge av endringer i fokus og zoom.*

---

## 5. Diskusjon

### 5.1 Kalibrering i Nlhbunt

For å kunne bedømme resultatene fra testfelt kalibreringene i Nlhbunt er det nødvendig med en gjennomgang av kvaliteten i testfeltet.

#### Kvaliteten og nøyaktigheten til kalibreringene

Å vurdere kvaliteten av en kalibrering er en sammensatt oppgave, og det er mange faktorer å ta hensyn til. Det første spørsmålet man bør stille seg er hvilket formål resultatene fra testfeltet skal brukes til? Dette går spesielt på hvor nøyaktig man ønsker at parameterne skal beskrives. Den projektive koblingen internt mellom parameterne og eksternt med den ytre orienteringen, vil måtte vurderes etter formål og bruksområde.

Formålet for kalibreringene i denne oppgaven vil være utnyttelse av kameraene innenfor Instituttets fagfelt. Derfor bør testfeltet være så stort så mulig, og avstanden mellom testfeltet og fotostasjonen være så stor som mulig. Siden det overordnede målet i denne oppgaven er en kalibrering, ønskes det å beskrive parameterne så nøyaktig som mulig. Fraser (1997) mener det er tre faktorer som avgjør kvaliteten til en kalibrering. Disse er:

- Punktfordeling i bildene
- RMS eller standardavviket i beregningen
- Fotogrammetrisk nettverkskonfigurasjon

Testfeltet etablert i denne oppgaven har god punktspredning. Dette er viktig fordi polynomfunksjoner brukes til å modellere desentrerende og radiell fortegning. For at fortegningsparameterne skal komme til sin rett er man avhengig av å beskrive

---

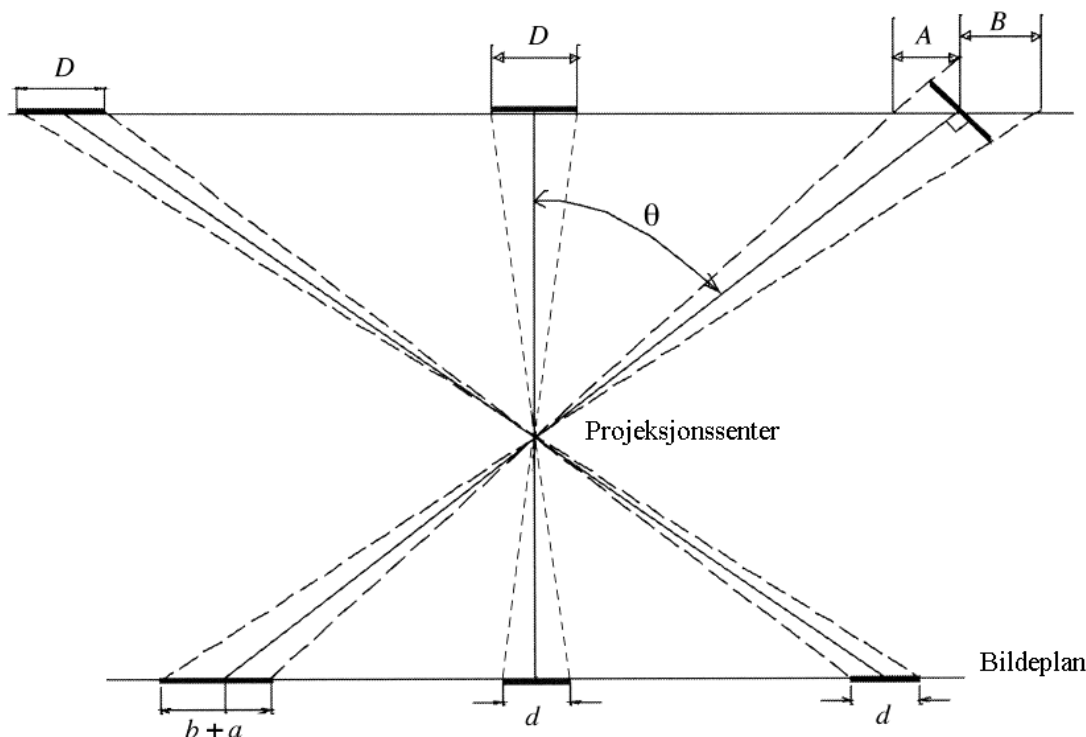
fortegningene helt ut i ytterkant av bildet. Hvis dette ikke er tilfellet vil polynomfunksjonene fungere mot sin hensikt (Fraser, 1997). Antall kontrollpunkt i testfeltet er holdt til et minimum, men det er nok punkt til å bestemme gode fortegningsparametere (figur 5.1). Fra teorien vet vi at testfelt normalt består av 30-100 kontrollpunkt (Fryer, 1996). I den senere tiden har billedbehandlingsmetoder blitt utviklet slik at gjenkjenning og bildemålinger av kontrollpunkt i dag normalt skjer helautomatisk. Derfor, hvis kamerakalibrering er hensikten, blir det i praksis brukt flere hundre kontrollpunkt (Mostafa, 2004; Kröpfl et al, 2004). Antall kontrollpunkt var i første rekke motivert av at man på denne måten har bedre kontroll på målingene. I og med at alle målinger i denne oppgaven gjøres manuelt vil det være lettere å gjennomføre og ha kontroll på eventuelle grove feil, med et mindre antall kontrollpunkt.



*Figur 5.1: Kontrollpunkt fordelingen i testfeltet*

En vurdering av standardavviket vil i denne oppgaven bli brukt for å vurdere det totale forbedringspotensialet. Eventuelle restfeil etter en kalibrering vil i hovedsak skyldes unøyaktige målinger, restfeil i kontrollpunkt og eventuelle andre resterende fortegninger. For det digitale kameraet vil målenøyaktigheten begrenses av signal

utformingen. Signalene egner seg godt for innmåling og for måling i Hasselblad bildene da den indre sirkelen kommer godt frem i Hasselblad bildene og i totalstasjonen. For digitalkameraet sin del blir den indre sirkelen borte på grunn av begrensningen i oppløsningen, slik at hele signalet blir utgangspunktet for bildemålingene. Dette utgjør 10 piksler i høyde og bredde. Ideelt sett burde det vært færre piksler å måle for å kunne sentrere målemerket godt nok. I følge Beyer (1992) bør måle merket utgjøre 3 piksler. Dette begrunnes i første rekke av at en piksel bredde på tre piksler vil være optimalt for sub piksel beregninger som følge av effekten sentralprojeksjonen har for et signal (Robson og Shortis, 1998). Figur 5.2 viser hvordan sentralprojeksjonene påvirker målinger i ytterkant av bildet, med mindre målemerket er parallelt med bildeplanet, vil målemerket fremtre skjevt på bildeplanet. Denne feilen blir større jo flere piksler et målemerke utgjør. Det er allikevel en stor fordel med store målemerker, siden man har mulighet til å utvide testfeltet med fotostasjoner med større avstander og fortsatt kunne bruke målemerkene.



Figur 5.2: Sentralprojeksjonens påvirkning av signaler. Fra (Robson og Shortis, 1998)



---

Fotogrammetrisk nettverkgeometri er en forutsetning for all fotogrammetri. God geometri i testfeltet er den viktigste faktoren for en vellykket kalibrering. Når det gjelder nettverksgeometrien i testfeltet i denne oppgaven, vil man i ettertid se at små justeringer vil kunne bedre geometrien betraktelig. Testfeltet utnytter seg av tre fotostasjoner. Dette er et minimum av hva som er påkrevd og normalt sett bør man ha minimum fire stasjoner (Fraser, 1996). Dette kravet settes først og fremst for å kunne gjennomføre grovfeilsøk. Som tidligere nevnt begrunnes denne minimalismen med at et enkelt nettverk fører til en enklere jobb i ettertid. Dette gjelder både antall kontrollpunkt, stasjoner og eksponeringer. Resultatet viser at i et såpass lite nettverk vil tre stasjoner holde, i hvert fall med tanke på å ta ut grove feil og for å få en god punktbestemmelse. Et godt fotogrammetrisk nettverk kjennetegnes av at kontrollpunktene er godt fordelt i tre dimensjoner (Fraser, 1996). Testfeltet i denne oppgaven ble etablert med en dybde på ca 25 % av fotoavstanden, og som resultatene viser er dette den største svakheten ved feltet. Et dypere testfelt ville helt klart ha gitt en sikrere bestemmelse av tilleggsparameterne, særlig gjelder det de parameterne som bestemmes på grunnlag av restfeil i høyden.

Den projektive koblingen mellom radiell fortegning, kamerakonstanten og den ytre orienteringen, krever en god nettverksgeometri i testfeltet for å fordele de systematiske feilene korrekt mellom de fysiske parameterne. Usikkerheten i testfeltet ligger i første rekke i hvordan dybden i feltet blir ivaretatt. Et avstands:dybde forholdet på ca 25% er ikke uvanlig innen fly fotogrammetrien i Norge, men vanligvis vil man i flyfotogrammetrien operere med færre kontrollpunkt. Fra teorien vet vi at en kalibrering bør skje under tilnærmet samme forhold som under kartleggingsoppdragene, flykameraene er som oftest kalibrert i et laboratorium, i et tempert rom og under rolige omgivelser. I et fly er forholdene helt andre og det er en kjent sak at den indre geometrien påvirkes av forholdene i flyet, som for eksempel temperatur og støt. Man utnytter seg derfor av den ytre orienteringens evne til å absorbere eventuell forandring i den indre geometrien. Som kontroll utføres av og til en in-flight kalibrering som verifikasjon på kamera produsentens kalibreringer. 20 % dybde blir ikke regnet som god nok dybde til å bestemme kamera konstanten ved slike

---

testflyginger. For å få kontroll på kamera konstanten, og for å løse ut kamera konstanten ved hjelp av tilleggsparemetere, vil man være avhengig av å fly i to høyder (Yastikli og Jacobsen, 2005).

En enkel måte å belyse dette på ble gjennomført i Match-AT. Først ble kontrollpunktene i x og y låst, mens standardavviket i z retningen satt høyt. Deretter ble en serie kalibreringer gjennomført der kamera konstanten ble variert. Resultatet var at RMS verdiene for Z gikk fra negative til positive, mens projeksjonssenteret holdt seg tilnærmet konstant. Dette belyser også hvor mye kamera konstanten har og si for høyde forskjellene i en beregningen. I det z passerer null og RMS verdiene minimaliseres har vi en tilnærmet korrekt kamerakonstant, men fordi den ytre orienteringen av kameraet heller ikke er kjent vil ikke dette holde for en definisjon av kamera konstanten. Allikevel vil dette gi en tilnærmet verdi. Tilsvarende forsøk ble også gjennomført i Image Station, med resultatet at den ytre orienteringen ble forskjøvet på samme måten som høyden ble forskjøvet i Match-AT. Dette resultatet skyldes lavere vektning av projeksjonssenteret.

På bakgrunn av at det til nå viser seg vanskelig å avgjøre den ytre orienteringen finnes det nå tre mulige utvidelser av testfeltet, for å oppnå en bedre geometri, disse er:

- Låse den ytre orienteringen i stasjonspunktene
- Etablere flere kontrollpunkt nærmere fotostasjonene
- Etablere nye fotostasjoner i en annen avstand til testfeltet

Ved å låse stasjonspunktene vil man kunne tvinge på plass ”riktig” kamerakonstant. Men i dette tilfellet vil ikke dette være ideelt da projeksjonssenteret i stasjonspunktet ikke er bestemt med den samme nøyaktighet som man forventer av de indre orienteringsparameterne. Det kunne allikevel vært interessant å se på hvorvidt man kan utnytte seg av mulighetene for å gi inn vektete GPS og INS data i Nlhunt. På den måten kan man beregne eventuell eksentritet mellom stasjonspunkt og projeksjonssenter. For denne oppgaven ble de ytre orienteringsparameterne brukt som

---

en overordnet kontroll, og en eventuell feil i den ytre orienteringen vil da skyldes svak geometri. En etablering av flere stasjonspunkt vil være for tidskrevende for denne oppgaven, og ble ikke vurdert. Testfeltet ble i stedet utvidet med to supplerende fotostasjoner for det digitale kameraet. Dette vil kunne gi svar på om det er nødvendig å gjøre det samme for det analoge kameraet.

En annen projektiv kobling som ofte utnyttes som en positiv effekt innen nærfotogrammetrien eksisterer mellom hovedpunktet, den tangentielle desentrerende fortegningen og de ytre orienteringsparameterne ( $x$  og  $y$ ). For å få en sikrere bestemmelse av disse parameterne anbefales det å innføre  $90^\circ$  dreining av kameraet ved alle fotostasjonene (Fraser, 1997). Vertikale eksponeringer er ikke brukt i denne oppgaven, men utgjør allikevel et mindre problem enn den foregående diskusjonen rundt antall fotostasjoner og dybde i kalibreringsfeltet.

### Kalibreringen av Canon kameraet

Resultatet av kalibreringen av Canon kameraet i det utvidete testfeltet er vist i kapittel 4. Den utvidete kalibreringen viser en forbedret ytre orientering i forhold til den gamle tre stasjoners kalibreringen. Dette er et tydelig tegn på at geometrien i testfeltet er bedret. Flere kalibreringer ble gjennomført med det samme resultatet. På grunnlag av dette kan man nå si at en utvidelse av testfeltet er en nødvendighet for å få kontroll på de projektive parameterne. Spesielt er dette viktig for å fastlegge kamera konstanten.

### Kalibreringen av Hasselblad kameraet

Kalibreringen av Hasselblad kameraet viser at de systematiske feilene blir fordelt feil mellom parameterne, noe som i hovedsak kan begrunnes i at beregningen ender i feil ytre orientering. Derfor er det knyttet en del usikkerhet til kalibreringsresultatet og det vil derfor være nødvendig å utvide testfeltet med to nye fotostasjoner for Hasselblad kameraet. En ny kalibrering av Hasselblad kameraet vil ikke nødvendigvis gi et bedre resultat, men det vil gi et sikrere estimat av enkelte av tilleggsparameterne.

---

## Nøyaktighets gevinst ved kalibreringene

Det er viktig å merke seg at den foregående diskusjonen angående dybde i feltet og projektive koblinger mellom parametere, ikke vil ha betydning for bruken av testfeltet i vurderingen av samlet nøyaktighetsgevinst. Testfeltet har en god punktgeometri med mange og nøyaktig målte punkt. Testfeltet er derfor godt egnet til å beregne RMS av punktene og til å finne eventuelle grove feil i punkt målingene. Derimot var det på forhånd forventet lavere nøyaktighetsgevinst for Hasselblad kameraet enn for Canon kameraet. Dette begrunnes i at geometrien i Hasselblad kalibreringen er betraktelig dårligere enn tilfelle er for Canon kalibreringen.

Ved å tilbakeføre kalibreringsparameterne til Image station, viser resultatene en klar forbedring både for Hasselblad kameraet og for Canon kameraet. Den samlede nøyaktighetsgevinsten i bildemålingene begrenses noe av unøyaktige målinger, men resultatene viser hvilket forbedringspotensialet som ligger i kamera kalibrering. Hasselblad kameraet viste seg å ha størst nøyaktighetsgevinst ved innføring av kalibreringsparameterne. Dette noe overraskende resultatet skyldes mest sannsynlig at Hasselblad kameraet har et større bildeplan enn Canon kameraet. Derfor vil innslaget av radiell fortegnings bli større.

Selv om Hasselblad kameraet viser størst forbedringspotensial, oppnår Canon kameraet det laveste standardavviket både for punktnøyaktighet og for bildemålinger. Dette viser at kalibreringen av Canon kameraet er mer vellykket. Det er i hovedsak to grunner som støtter denne påstanden. For det første viser Canon kameraet kalibrering til et sikrere resultat med tanke på geometri. For det andre har Canon kameraet dårligere forutsetninger for nøyaktige målinger på grunn av lavere romligoppløsning i bildene kontra signal utforming.

Selv om resultatet viser en klar forbedring, vil det være mulig å forbedre standardavviket.

---

## 5.2 Kalibrering i Photomodeler

Kalibreringen i Photomodeler viser et betydelig mindre innslag av radiell fortegning enn resultatet fra Nihbunt kalibreringen. Hva er grunnen til at Canon kameraet nå viser seg å være tilnærmet fri for fortegning? Det finnes tre mulige grunner til resultatet av kalibreringen i Photomodeler. Disse er:

- Linsen er tilnærmet fri for fortegning
- Ccd brikken utnytter seg av en så liten del av linsen, og derfor opptrer linsen som om den har veldig lite fortegning.
- Fortegningsfeilen skjuler seg i en av de andre kalibreringsparameterne eller i den ytre orienteringen.

Det er ikke uvanlig at digitale kameraer kun utnytter seg av en liten del av linsen, og på den måten tar vekk de mest ekstreme verdiene av fortegningen. Photomodeler er en programvarepakke, der kalibreringsrutinene er ment som et supplement for å forbedre bildemålingene. Derfor er det ikke usannsynlig at Photomodeler utnytter seg av den projektive koblingen mellom den radielle og desentrerende fortegningen og de andre orienteringsparameterne. Deler av restfeilen som skyldes den desentrerende fortegningen blir overført til hovedpunktet og deler av restfeilen som skyldes den radielle fortegningen blir overført til kamerakonstanten og den ytre orienteringen.

En mulig måte å eliminere de to første punktene i listen, ville være å innføre en kalibrering av Hasselblad kameraet i Photomodeler. Bildeplanet i Hasselblad kameraet er større og utnytter derfor hele linsen. Det vil dessuten også være en stor andel av radiell fortegning i denne linsen. Hadde Hasselblad kameraet fått tilsvarende fortegningskurver som Canon kameraet i Photomodelers kalibrering, ville dette skyldes at Photomodeler utnytter seg av projektive koblinger. Allikevel kan vi ut i fra det gode resultatet som ble oppnådd i kalibreringen i Nihbunt konkludere med at Canon kameraet reelt har større fortegning enn hva resultatet i Photomodeler viser. Dette gjør det vanskelig å overføre resultatet til annen programvare som for eksempel

---

Image Station. Den desentrerende fortegningen vil i og for seg være overførbar, siden vi kjenner forflytningen av hovedpunktet. Den radielle fortegningen vil derimot ikke la seg overføre uten videre, på grunn av at annen programvare ikke vil gjenkjenne forflytninger av den ytre orienteringen. Det ble gjort et forsøk på å innføre den radielle fortegningen i Image Station i håp om at programmet ville justere den ytre orienteringen og kamerakonstanten, men resultatet viste ingen merkbar forbedring.

### Selvkalibrering i Photomodeler

Det ble gjort et forsøk på å utnytte selv-kalibrerings funksjonen i Photomodeler. Til dette forsøket ble Canon kameraet benyttet. Tre fotostasjoner inngikk i kalibreringen, men denne geometrien var ikke god nok til å få en løsning. Allikevel viser resultatet at Photomodeler også støtter den foregående diskusjonen om at nettverksgeometrien ikke er god nok. Photomodeler baserer seg i hovedsak på konvergente målinger for å kunne definere kamera konstanten. Derfor vil ikke kalibreringsfeltet og de ”vertikale” bildene egne seg spesielt godt til bruk i Photomodeler. Allikevel ville nok parametersettet bli løst hvis dybden i testfelte hadde vært større.

### 5.2.2 Stabilitet

Stabile kameraer er en forutsetning ved bruk av pre-kalibreringer som for eksempel Photomodeler. Derfor bør et kamera enten post-kalibreres eller en form for selvkalibrering bør utføres i felt. Kalibrering i Photomodeler ble utført på det digitale Canon kameraet. Resultatene viser hvordan de indre orienteringsparameterne varierer ved fokus og zoom.

Resultatene viser at ved å variere fokus eller zoom flytter man linsene og dermed vil kamera konstanten forandres. Fokus endringer vil påvirke kamera konstanten i liten grad, mens ved bruk av zoom vil kamera konstanten og dermed også den indre geometrien forandres betraktelig.

Variasjoner i fortegningen som følge av fokus endring vil ha konsekvenser for fotogrammetriske målinger. Fra teorien vet vi at radiell fortegnings er den mest stabile

---

av de indre orienteringsparameterne, forutsatt at kameraet ikke blir re-fokusert (Shortis et al, 1996). Resultatet fra Photomodeler viser at så lenge kameraet blir stilt tilbake til tilnærmet samme fokussetting som ved kalibrering vil både den radielle og den desentrerende fortegningen være så godt som den samme som ved kalibrering.

Resultatene (figur 4.6-4.8) viser at bruk av zoom linsen fører med seg en drastisk endring i hovedpunkt, desentrerende fortegning og radiell fortegning. Dette resultatet er som forventet og støttes i litteraturen (Fryer, 1996; Shortis et al, 1996). Det viser at det vil være vanskelig å utnytte seg av zoom funksjoner i forbindelse med objekt målinger med mindre man har et godt selvkalibrerende nettverk, som for eksempel Photomodeler utnytter seg av. Det vil være umulig å treffe den samme zoom innstillingen to ganger, og i tilfeller der en liten forskjell i zoom innstillingen utgjør store forandringer i den indre geometrien bør ikke zoom funksjoner brukes. Generelt prøver man innenfor fotogrammetrien å unngå zoomlinser. Dette begrunnes i at disse er svært ustabile med tanke på den indre geometrien. Allikevel fører markedsføringen av kameraer med zoom linser til at det i dag brukes en del innen fotogrammetrisk virksomhet og det er derfor en aktuell problemstilling. Zoom linser er kompliserte sammensatte linser og ved bruk antas det at den indre geometrien er mekanisk mer ustabil enn for linser med fast brennvidde. Mekanikken i kameraet vil over tid føre til en forandring av den desentrerende fortegningen. I denne oppgaven ble ikke permanente mekaniske forandringer i linse systemet vurdert, men det er allikevel et viktig moment i en total vurdering av den indre geometrien til et kamera.

---

### 5.3 Videreføring av oppgaven

For å kunne anvende Hasselblad kameraet til fotogrammetriske formål er man avhengig av å fullføre kalibreringen av kameraet. Resultatet i denne oppgaven viser et stort forbedringspotensial for Hasselblad kameraet. Derfor vil en utvidelse av testfeltet for kalibrering av Hasselblad kameraet gi en sikrere kalibrering.

Den mest naturlige videreføringen vil være å ta i bruk nærfotogrammetrien i fagfeltene til institutt for geofag. I hvilken grad nærfotogrammetri kan brukes til datafangst av for eksempel overflate endringer. I den forbindelse vil særlig nøyaktighets endringer ved innføring av kalibrerings parameterne fra denne oppgaven være interessant.



---

## 6. Konklusjon

I denne oppgaven har kalibreringsmetodene i Photomodeler og Nlhbunt blitt vurdert for utnyttelse innenfor Institutt for geofag sine fagfelt. Som grunnlag for vurderingen har det blitt brukt et digitalt Canon kamera og et analogt Hasselblad kamera. På grunnlag av resultatene kan følgende konklusjon trekkes:

Photomodelers kalibreringsresultat lar seg ikke uten videre overføre til annen programvare. Dette begrunnes ved at den projektive kobling mellom parameterne i kalibreringen vil føre til at Photomodeler fordeler de systematiske restfeilene galt.

Nlhbunt gir en bedre kontroll for operatør enn Photomodeler, men krever et kalibreringstestfelt med en bedre nettverksgeometri enn hva som er tilfelle i denne oppgaven. Derfor anbefales en utvidelse av testfeltet med to nye fotostasjoner og en vertikal eksponering i hver stasjon. Ved å innføre to nye fotostasjoner vil korrelasjonen mellom den ytre orienteringen og kamerakonstanten minke. Ved å innføre en vertikal eksponering i hver fotostasjon vil korrelasjonen mellom hovedpunktet og den ytre orienteringen minke.

Resultatet av kalibreringen i Nlhbunt viser at forbedringspotensialet ved innføring av kalibreringsparametere er høyt. Hasselblad kameraet viser en forbedring i bildemålingene på over 25  $\mu\text{m}$ .

---

## Kildeliste

- Ahmad, A. og Chandler, J. H. (1999). Photogrammetric Capabilities of the Kodak DC40, DCS420 and DCS460 Digital Cameras. *Photogrammetric Record*, Vol. 16, side 601.
- Andersen, Ø., Blankenberg, L.E. og Maalen-Johansen, I. (1994). "Nye Bilde-Tall-Terreng", Landbruksforlaget
- Beamish, J.K. (Editor) (1984). "Close-range photogrammetry and surveying : state-of-the-art". American Society of Photogrammetry, Falls Church, Virginia, USA. 941 sider.
- Beyer, H.A., (1992). "Geometric and Radiometric Analysis of a CCD camera based Photogrammetric Close Range System", PhD thesis, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, Zurich, Switzerland, 186 sider.
- Brown, D.C., (1966). "Decentering distortion of lenses". *Photogrammetric Engineering*, 32(3): 444-462.
- Brown, D.C., (1971). "Close Range Camera Calibration", *Photogrammetric Engineering*, 37(8):855-866.
- Butler, J. B., Lane, S. N., Chandler, J. H. og Porfiri, E. (2002). "Through-water close range digital photogrammetry in flume and field environments". *Photogrammetric Record*. Vol. 17, no. 99, side 419-39.
- Chandler J. H., Fryer J. G. og Jack A. (2005). "Metric capabilities of low-cost digital cameras for close range surface measurement". *Photogrammetric Record* Vol. 20, side 12.
- Clarke, T.A., Fryer, J.F. og Wang, X. (1998). "The principal point and CCD cameras". *Photogrammetric Record* 16(92), side 293-312.
- Clarke, T.A. og Fryer, J.F. (1998). "The development of camera calibration methods and models". *Photogrammetric Record*, 16(91): side 51-66.
- Cramer, M. (2004). "EuroSDR Network on Digital Camera Calibration". *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXV. side 204 - 209.
- Dirk H., Rieke Zapp og Mark A. N. (2005). "Digital close range photogrammetry for measurement of soil erosion". *Photogrammetric Record* Vol. 20, side 69.
- Ebner, H. (1976). 'Self calibrating block adjustment', *Bildmessung und Luftbildwesen* 44, side 128-139.
- EOS (2003). *PhotoModeler pro 5.0 Users Manual*.
- Fryer, J.G. og Brown, D.C. (1986). "Lens distortion in close range photogrammetry". *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 52(2):51-58.

- 
- Fryer, J.G. Clarke, T.A. og Chen, J. (1994). "Lens distortion for simple 'C' mount lenses". *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 30(5): 97-101.
- Fryer, J. G. (1996). "Camera calibration. Close Range Photogrammetry and Machine Vision" (Ed. K. B. Atkinson). Whittles Publishing, Caithness. 371 side 156–179.
- Fraser, C. S. (1997). "Digital camera self-calibration". *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 52(4): 149–159.
- Heikkilä, J. (2000). "Geometric Camera Calibration Using Circular Control Points", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 22, No. 10, side 1066-1077
- Inpho (2003). Match-AT user manual
- Kenefick, J.F., Gyer, M.S. og Harp, B.F. (1972). Analytical self-calibration. *Photogrammetric Engineering*, 38(11):1117-1126.
- Kilpela, E., Heikkila, J. og Inkila, K (1981). "Compensation of systematic errors in bundle adjustment". *Photogrammetria*. Vol. 37, side 1-13.
- Kröpfel M. , Kruck E. og Gruber M. (2004). "Geometric Calibration of The Digital Large Format Aerial Camera Ultracam". *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXV.
- Moffit, F. H. og Mikhail, E. M. (1980). "Photogrammetry", Harper & Row publishers, New York.
- Mostafa, M. (2004). "Camera/IMU boresight calibration – new advances and performance analysis". Tilgjengelig: [www.applanix.com](http://www.applanix.com), 12 sider.
- Norkart (2000). NLHBUNT user manual.
- Pitkanen, T. and Kajuutti, K. (2004). "Close-range photogrammetry as a tool in glacier change detection". *International Archives of the Photogrammetry*
- Robson, S. og Shortis, M. R. (1998). "Practical influences of geometric and radiometric image quality provided by different digital camera systems". *Photogrammetric Record*, 16(92): 225-248
- Roelofs, R. (1951). "Distortion, principal point, point of symmetry and calibrated principal point". *Photogrammetria*, 7(2): 49-66.
- Shortis, M. R., Robson, S. og Beyer, H. A. (1998). "Principal point behaviour and calibration parameter models for Kodak DCS cameras". *Photogrammetric Record*, 16(92): 165–186.
- Shortis, M.R., Robson, S., og Short, T. (1996). "Multiple focus calibration of a still video camera". *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* 31 (5), 534-539.

- 
- Sørensen J. K. Overby I. Christiansen L. D. og Jensen P. (2001). ”*Digital fotogrammetri en vurdering av Photomodelers anvendelighet i tekniske prosjekter*”. Hovedfagsoppgave ved Aalborg universitet.
- Tayman, W.P. og Ziemann, H. (1984). ”Photogrammetric camera calibration”. *Photogrammetria*, 39(2):31-53.
- Yastikli, N. og Jacobsen, K. (2005). ”Influence of System Calibration on Direct Sensor Orientation”. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* (71), No. 5. side 629.



## **Vedlegg**

Vedlegg A    Eksempel på beregningsresultat fra Photomodeler

Vedlegg B    Eksempel på beregningsresultat fra Nlhbunt

---

Vedlegg A. Eksempel på beregningsresultat fra Photomodeler

Status Report Tree

PhotoModeler Version: 5.1.0

Project Name: 19.pmr

Problems and Suggestions (0)

Project Problems (0)

Problems related to most recent processing (0)

Information from most recent processing

Last Processing Attempt: Mon Feb 20 10:13:24 2006

Status: successful

Processing Options

Orientation: off

Global Optimization: on

Calibration: on (full calibration)

Constraints: off

Total Error

Number of Processing Iterations: 5

Number of Processing Stages: 2

First Error: 0.076

Last Error: 0.018

Precisions / Standard Deviations

Camera Calibration Standard Deviations

Camera1: Camera 1

Focal Length

Value: 20.176960 mm

Deviation: Focal: 0.003 mm

Xp - principal point x

---

---

Value: 11.726372 mm

Deviation: Xp: 0.003 mm

Yp - principal point y

Value: 7.702185 mm

Deviation: Yp: 0.003 mm

Fw - format width

Value: 23.223356 mm

Deviation: Fw: 5.6e-004 mm

K1 - radial distortion 1

Value: 3.204e-004

Deviation: K1: 1.8e-006

K2 - radial distortion 2

Value: -4.002e-007

Deviation: K2: 1.9e-008

K3 - radial distortion 3

Value: 0.000e+000

P1 - decentering distortion 1

Value: -5.989e-005

Deviation: P1: 2.1e-006

P2 - decentering distortion 2

Value: 4.653e-005

Deviation: P2: 2.2e-006

Quality

Photographs

Total Number: 10

---



---

Bad Photos: 0

Weak Photos: 0

OK Photos: 10

Number Oriented: 10

Number with inverse camera flags set: 0

#### Cameras

Camera1: Camera 1

Calibration: yes

Number of photos using camera: 10

#### Point Marking Residuals

Overall RMS: 0.096 pixels

Maximum: 0.342 pixels

Point 29 on Photo 4

Minimum: 0.063 pixels

Point 1004 on Photo 5

Maximum RMS: 0.172 pixels

Point 2

Minimum RMS: 0.047 pixels

Point 1004

#### Point Tightness

Maximum: 0.00043 m

Point 2

Minimum: 6.7e-005 m

Point 37

#### Point Precisions

Overall RMS Vector Length: 7.85e-005 m

Maximum Vector Length: 8.9e-005 m

---

---

Point 97

Minimum Vector Length:  $7.38 \times 10^{-5}$  m

Point 9

Maximum X:  $4.53 \times 10^{-5}$  m

Maximum Y:  $4.53 \times 10^{-5}$  m

Maximum Z:  $6.55 \times 10^{-5}$  m

Minimum X:  $2.72 \times 10^{-5}$  m

Minimum Y:  $2.97 \times 10^{-5}$  m

Minimum Z:  $5.81 \times 10^{-5}$  m

---

---

## Vedlegg B. Eksempel på beregningsresultat fra Nlhbunt.

```
*****
****
* BUNDLE BLOCK ADJUSTMENT - NLHBUNT, VER. 19/4-2001   Copyright: Norkart
A/S *
*****
****
Project directory      : HASS
Project title         : TITLE
Job ID.               : 97000
Calculated by         : NN
Date                  : Friday  3/3-2006  16:25:26
Camera                :
Focal length(s)       : Camera no. 1 = 60.802 mm
Image scale           : 1:10
A priori sigma-naught : 4.00 æm
Estimated sigma-naught : 24.65 æm

=====
====
=   SELF CALIBRATIONS PARAMETERS   Estimated par.   St.dev.   Par./St.dev.
=
=====
====
      P1 Focal length                :      63.7948      0.3338      8.97
      P2 Principal point - X          :      0.1710      0.1889      0.90
      P3 Principal point - Y          :     -0.2321      0.1850      1.25
      P7 Affine distortion             : -6.060E-0004  1.4332E-0003      0.42
      P8 Affine distortion             : -7.077E-0004  1.4397E-0003      0.49

=====
====
=           RESIDUALS ON IMAGE MEASUREMENTS AND GROUND CONTROL POINTS
=
=====
====
- Units in the listing : Image coordinates      < mm >
                        Residuals on the image coordinates < æm >
                        Ground control points (GCP)      < m >
                        Residuals on the ground control points < m >

- Valid point codes   : A = GCP in XYZ          AK = check point
XYZ
                        G = GCP in XY, Z is unknown   GK = check point XY
                        H = GCP in Z, XY is unknown   HK = check point Z
                        U = XYZ is unknown point

- Only observations with residuals > 2.0 x sigma-naught is listed.

-----
-----
      Point Co. Image/GCP   Observation  r          v          nabla      w
com/we
-----
-----
      PP4 A                GCP X      -32.241 0.77      -1.576      2.043      2.91
                        Y          254.420 0.80        0.238      -0.297     -0.43
                        Z          611.773 0.46       -0.473      1.031      1.13
      PP19 A               GCP X     -199.115 0.90       -0.188      0.208      0.32
                        Y          213.694 0.89        0.292     -0.327     -0.50
                        Z          481.995 0.51       -1.438      2.828      3.27 *
      PP20 A               GCP X     -168.145 0.91       -0.041      0.046      0.07
                        Y          214.005 0.89        0.327     -0.367     -0.56
```

---

		Z	481.117	0.51	-1.478	2.896	3.36	*
1.0	PP21 A	01 x	-6.379	0.34	50.2	-149.6	-3.52	*
		Y	5.089	0.49	-0.4	0.8	0.02	
1.0	PP25 A	GCP X	-234.138	0.91	-0.420	0.463	0.72	
		Y	178.709	0.91	0.118	-0.130	-0.20	
		Z	482.751	0.49	-1.360	2.798	3.17	*
	PP29 A	GCP X	-196.820	0.94	-0.254	0.272	0.43	
		Y	154.857	0.93	0.324	-0.347	-0.54	
		Z	504.175	0.56	-1.544	2.753	3.35	*
	PP30 A	GCP X	-166.073	0.94	-0.138	0.148	0.23	
		Y	154.728	0.93	0.305	-0.327	-0.51	
		Z	503.099	0.56	-1.586	2.827	3.44	*
	PP34 A	GCP X	-182.646	0.92	-0.257	0.279	0.43	
		Y	127.120	0.92	0.002	-0.002	-0.00	
		Z	482.355	0.51	-1.789	3.531	4.08	**
	PP9 A	GCP X	-303.081	0.80	1.244	-1.559	-2.26	
		Y	254.888	0.81	0.200	-0.247	-0.36	
		Z	618.972	0.46	-0.352	0.768	0.84	
	PP46 A	GCP X	-351.293	0.75	-1.360	1.807	2.54	
		Y	27.788	0.75	-0.969	1.291	1.81	
		Z	487.140	0.31	0.378	-1.231	-1.11	

```

=====
====
=
          STATISTICS FROM THE BUNDLE BLOCK ADJUSTMENT
=
=====
====
Max. change of unknown coords. in the last iteration :
0.000
No. of images :
3
No. of image coordinates :
212
No. of ground control point (GCP) coordinates :
138
No. of unknown coordinates :
0
Redundancy :
185.00
RMS of residuals in image points (mm) 1) :
0.0293
RMS of residuals in GCP - Planimetry (m) 1) :
0.0270
RMS of residuals in GCP - Height (m) :
0.0346
äpvv calculated in two different ways : 0.179466
0.114833

Estimated sigma-naught (æm) :
30.81

1) Estimated as  $\hat{u}(\hat{\sigma}^2(\sum Vx\hat{y} + \sum Vy\hat{y}) / \text{No. of points})$ 
-----
-----

```

```

ALPHABETIC LISTING OF ALL POINTS IN THE ADJUSTMENT WITH ESTIMATED ST.DEV.
(m)
-----
-----
Point Code      X      Y      Z      Sx      Sy      Sz

```

-----						
----						
0.100*	PP1	A	-191.338	301.777	571.355	0.100* 0.100*
0.100*	PP2	A	-168.103	301.732	570.212	0.100* 0.100*
0.100*	PP3	A	-58.313	301.920	565.149	0.100* 0.100*
0.100*	PP4	A	-32.241	254.420	611.773	0.100* 0.100*
0.100*	PP5	A	-86.469	255.036	613.262	0.100* 0.100*
0.100*	PP6	A	-165.133	255.068	615.467	0.100* 0.100*
0.100*	PP7	A	-192.250	254.676	616.248	0.100* 0.100*
0.100*	PP8	A	-272.615	254.783	618.181	0.100* 0.100*
0.100*	PP9	A	-303.081	254.888	618.972	0.100* 0.100*
0.100*	PP10	A	-350.326	247.192	488.042	0.100* 0.100*
0.100*	PP11	A	-182.719	247.422	482.998	0.100* 0.100*
0.100*	PP12	A	11.089	247.200	477.086	0.100* 0.100*
0.100*	PP13	A	-48.605	221.072	499.945	0.100* 0.100*
0.100*	PP14	A	-149.668	220.925	502.900	0.100* 0.100*
0.100*	PP15	A	-273.318	221.286	506.889	0.100* 0.100*
0.100*	PP16	A	-347.188	221.020	508.898	0.100* 0.100*
0.100*	PP17	A	-346.949	214.205	486.375	0.100* 0.100*
0.100*	PP18	A	-273.035	213.204	484.292	0.100* 0.100*
0.100*	PP19	A	-199.115	213.694	481.995	0.100* 0.100*
0.100*	PP20	A	-168.145	214.005	481.117	0.100* 0.100*
0.100*	PP21	A	-85.754	217.226	479.859	0.100* 0.100*
0.100*	PP22	A	10.922	216.832	477.089	0.100* 0.100*
0.100*	PP23	A	8.032	188.158	498.074	0.100* 0.100*
0.100*	PP24	A	-91.614	188.108	501.185	0.100* 0.100*
0.100*	PP25	A	-234.138	178.709	482.751	0.100* 0.100*
0.100*	PP26	A	-350.468	181.014	487.794	0.100* 0.100*
0.100*	PP27	A	-344.739	154.879	508.629	0.100* 0.100*
0.100*	PP28	A	-274.235	154.887	506.661	0.100* 0.100*
0.100*	PP29	A	-196.820	154.857	504.175	0.100* 0.100*
0.100*	PP30	A	-166.073	154.728	503.099	0.100* 0.100*
0.100*	PP31	A	-39.292	153.878	477.042	0.100* 0.100*
0.100*	PP32	A	10.772	127.346	476.837	0.100* 0.100*

0.100*	PP33	A	-85.892	127.329	479.539	0.100*	0.100*
0.100*	PP34	A	-182.646	127.120	482.355	0.100*	0.100*
0.100*	PP35	A	-280.012	129.796	485.611	0.100*	0.100*
0.100*	PP36	A	-350.269	105.968	487.542	0.100*	0.100*
0.100*	PP37	A	-263.122	77.623	552.586	0.100*	0.100*
0.100*	PP38	A	-161.777	77.092	549.384	0.100*	0.100*
0.100*	PP39	A	-122.199	57.191	494.741	0.100*	0.100*
0.100*	PP40	A	-86.149	56.787	494.416	0.100*	0.100*
0.100*	PP41	A	12.883	59.481	492.687	0.100*	0.100*
0.100*	PP42	A	12.957	9.294	474.957	0.100*	0.100*
0.100*	PP43	A	-92.645	8.342	477.984	0.100*	0.100*
0.100*	PP44	A	-189.767	7.053	550.256	0.100*	0.100*
0.100*	PP45	A	-318.134	7.453	553.737	0.100*	0.100*
0.100*	PP46	A	-351.293	27.788	487.140	0.100*	0.100*
-----							
----							
RMS of estimated st. dev. in							
Maximum of estimated st. dev.				:		0.000	0.000
0.000							
* = St. dev. is not estimated (A priori is shown)							
-----							
----							
EXTERIOR ORIENTATION PARAMETERS WITH ESTIMATED ST.DEV. (m/gon)							
-----							
----							
Image	X	Y	Z	Phi	Omega		
Kappa							
-----							
----							
01	9.975	164.692	1017.181	4.7890	0.7837		
399.6273	1.445	1.182	2.395	0.1683	0.1497		
0.0608							
02	-169.561	166.357	1016.761	1.9838	0.0948		
399.5003	1.057	1.108	2.515	0.1204	0.1367		
0.0515							
03	-347.727	169.626	1017.155	399.1041	0.1253		
399.5141	1.318	1.146	2.374	0.1652	0.1466		
0.0616							
-----							
----							
RMS of st.dev. :	1.284	1.146	2.429	0.1529	0.1444		
0.0581							

---

MAX st.dev.	:	1.445	1.182	2.515	0.1683	0.1497
0.0616						

---

----